SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matija Juras

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori: Student:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing. Matija Juras

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju, stručnim savjetima, motivaciji i podršci te pruženoj pomoći pri izradi ovog rada.

Posebno se zahvaljujem višoj asistentici dr. sc. Maji Remenar na izuzetno velikodušno uloženom trudu, pomoći i vremenu te pruženim korisnim, znanstvenim i stručnim savjetima i uputama koji su mi pomogli pri pisanju ovog rada.

Također, zahvaljujem se tehničkom osoblju Laboratorija za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje, koji su mi pomogli u pripremama za izvođenje eksperimenta.

Najveće i beskrajno hvala mojim roditeljima, Tatjani i Mladenu te bratu Antoniu koji su mi bili najveća podrška i oslonac, kako tijekom cijelog studija tako i za vrijeme izrade diplomskog rada.

Na kraju, zahvaljujem se i svojim najboljim prijateljima i kolegama koji su vjerovali u mene i bodrili me za vrijeme studiranja.

Matija Juras

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MATIJA JURAS** Mat. br.: 0035195576

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Parametrizacija senzora električnog luka pri MAG robotiziranom zavarivanju**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Parametrisation of through arc sensor at MAG robotic welding**

Opis zadatka:

Opisati vrste senzora koji se primjenjuju kod robotiziranog MAG zavarivanja, načiniti klasifikaciju te specificirati njihove značajke i ograničenja. Za senzore električnog luka odrediti područje primjene sa stanovišta vrste prijenosa metala u električnom luku te oblika i pripreme spoja. Dati primjere iz realne proizvodnje koji prikazuju mogućnosti i opravdanost upotrebe senzora pri robotiziranom MAG zavarivanju.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je za određeni oblik i geometriju spoja pripremljen za MAG robotizirano zavarivanje definirati sve potrebne parametre senzora električnog luka koji omogućuje praćenje putanje spoja. Odrediti moguća odstupanja te na realnom komadu i utvrditi kritične veličine parametara koji utječu na stabilnost vođenja pri pomaku ili deformaciji radnog komada. Zaključno nakon praktičnih proba ocijeniti prikladnost definiranih parametara i mogućnost primjene u stvarnoj proizvodnji.
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
27. rujna 2018.

Rok predaje rada:
29. studenog 2018.

Predviđeni datum obrane:
05. prosinca 2018.
06. prosinca 2018.
07. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS KRATICA

Kratica		**Značenje**
AE	(engl. arc end)	završetak uspostavljenog električnog luka
AI	(engl. *Artificial intelligence)*	umjetna inteligencija
AS	(engl. arc start)	početak uspostave električnog luka
CAD	(engl. *Computer Aided Design*)	konstruiranje pomoću računala
CAE	(engl. *Comupter Aided Engineering*)	inženjerstvo podržano računalom (korištenje računala i posebnih programa za provjeru ponašanja modela)
CAM	(engl. *Computer Aided Manufacturing*)	proizvodnja pomoću računala
CCD	(engl. *charge – coupled device*)	uređaj s fotodetektorima za pretvaranje za pretvaranje svijetlosti u digitalni signal
CMOS	(engl. *complementary metal oxide semiconductor*)	komplementarni metal-oksidni poluvodič
CV	(engl. *constant voltage characteristics*)	izvor napajanja s konstantnim naponom
ET	(engl. *end tracking)*	završetak funkcije praćenja
GMAW	(engl. *Gas metal arc welding)*	elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti plina
ISO	(engl. *International Organization for Standardization*	Internacionalna organizacija za standardizaciju
MAG	(engl. *Metal Active Gas*)	elektrolučno zavarivanje taljenjem u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina
ST	(engl. *start tracking)*	početak funkcije praćenja
WE	(engl. *weaving end)*	završetak provođenja tehnike njihanja
WFP	(engl. *weaving at fixed pattern*)	početak provođenja tehnike njihanja

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
A_5	%	produljenje
Ar	%	argon
C	%	ugljik
CEV	%	ekvivalent ugljika
CO_2	%	ugljikov dioksid
Cu	%	bakar
d	mm	promjer žice
I	A	jakost struje zavarivanja
L	H	induktivitet
$l_{SKŽ}$	mm	duljina slobodnog kraja žice
Mn	%	mangan
N	%	dušik
P	%	fosfor
Q	l/min	protok zaštitnog plina
Re	N/mm^2	granica razvlačenja
Rm	N/mm^2	vlačna čvrstoća
S	%	sumpor
Si	%	silicij
U	V	napon električnog luka
v_{zav}	m/min	brzina zavarivanja
X	mm	duljina pomaka pištolja
β_1	-	konstanta
β_2	-	konstanta
β_3	-	konstanta
β_4	-	konstanta

SAŽETAK

Tehnologija zavarivanja jedna je od najvažnijih tehnoloških procesa u metalnoj industriji. Osim razvoja tehnologije zavarivanja, kroz povijest su se razvile i druge grane industrije poput robotizacije. Ujedinjenjem, odnosno implementacijom robotizacije u tehnologiju zavarivanja, dolazi do razvoja nove grane u industriji pod nazivom robotizirano zavarivanje. Jedan od najčešće korištenih zavarivačkih postupaka koji se robotizira je postupak MAG zavarivanja. Kod robotiziranog zavarivanja vrlo važnu ulogu imaju senzori. Oni služe za kontrolu i praćenje putanje zavarenog spoja. U teorijskom dijelu rada govori se općenito o robotiziranom postupku MAG zavarivanja, vrstama senzora koji se primjenjuju kod robotiziranog MAG zavarivanja te njihovim značajkama, ograničenjima i primjeni u realnoj proizvodnji. U eksperimentalnom dijelu definiraju se parametri senzora električnog luka koji omogućuju praćenje putanje zavarenog spoja. Na kraju rada donesen je zaključak na temelju rezultata istraživanja.

Ključne riječi: MAG zavarivanje, robotizirano zavarivanje, senzori, klasifikacija senzora, senzor električnog luka, parametri, …

SUMMARY

Welding technology is one of the most important technological processes in the metal industry. Apart from the development of welding technology, other branches of industry such as robotization have developed through history. By unification or implementation of robotization in welding technology, a new branch of industry is emerging, called robotic welding. One of the most frequently used welding processes that is robotized is the MAG welding process. For robotic welding, sensors have a very important role. They are used for controlling and tracking the welded joint. In the theoretical part of the thesis, we talk about robot welding MAG welding, types of sensors applied to robotic MAG welding and their features, limitations and application in real production. In the experimental part, the parameters of the through arc sensor which enable tracing of the welding joint are defined. At the end of the work a conclusion was made based on the results of the research.

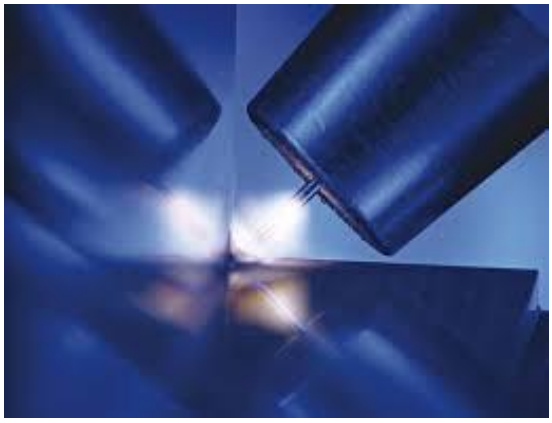
Key words: MAG welding, robotic welding, sensors, sensor classification, arc sensor, parameters, ...

1. UVOD

Jedan od najvažnijih i neizostavnih proizvodnih postupka današnjice u metalnoj industriji svakako je tehnološki postupak zavarivanje.

Već u starom vijeku pojavili su se prvi postupci zavarivanja. To su bili postupci zavarivanja (spajanja) kovanjem i lijevanjem, a razvili su se kao sastavni dio vještine kovača odnosno ljevača. Većina današnjih poznatih postupka zavarivanja otkrivena je u novom vijeku i to početkom 19. stoljeća kada se počeo istraživati električni luk za opću namjenu [1].

Na slici 1. prikazano je MAG zavarivanje kutnog spoja.



Slika 1. Električni luk kod MAG zavarivanja [2]

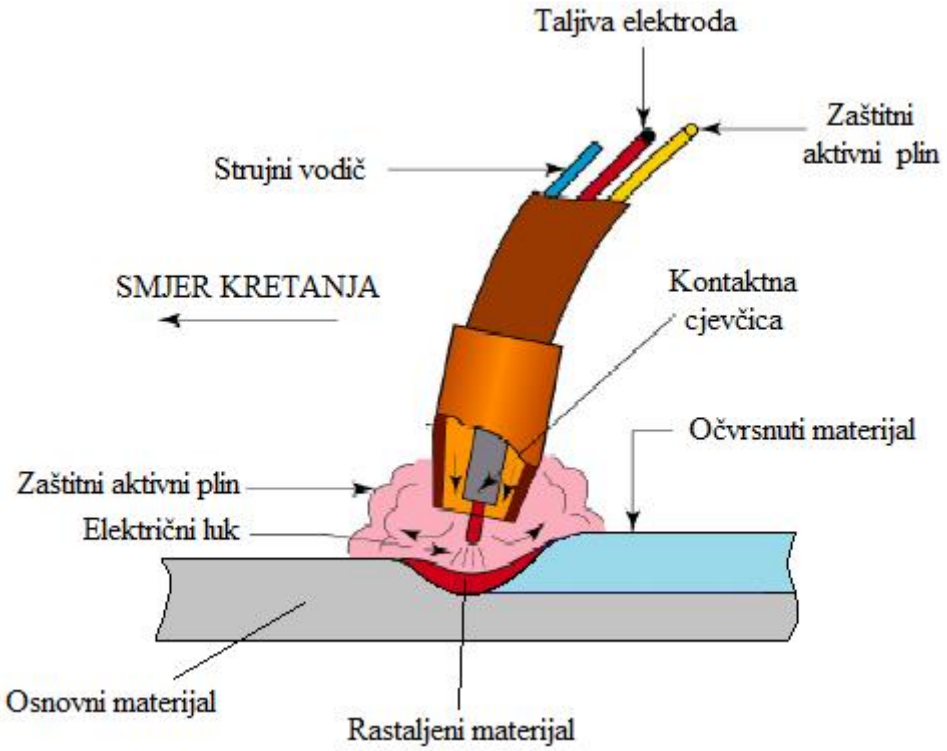
Razvojem zavarivačkih postupaka kroz povijest, razvijale su se i druge grane industrije poput robotike. Ujedinjavanjem, odnosno robotizacijom postupaka zavarivanja dovelo je do razvoja nove grane industrije pod nazivom robotizirano zavarivanje. Robotizirano zavarivanje nastoji osloboditi čovjeka od nehumanih, monotonih, opasnih te fizički teških poslova zavarivanja, a i mnogo je produktivnije i ekonomičnije od ručnog zavarivanja osobito kod ponovljivih poslova zavarivanja [3].

Robotizirano zavarivanje počinje se sve više implementirati u automatizirane sustave radi povećanja produktivnosti, ali i preciznosti zavara. Uvođenjem kompjuterskih tehnologija (CAD, CAM, CAE…) omogućuje se kvalitetniji pomak u proizvodnji zavarivanjem. Jednom kada se pravilno programira robot, postižu se vrlo precizni zavari bez ikakvih pogrešaka što dovodi do smanjenja otpadaka ili popravaka proizvoda. Upravo za takve kvalitetno postignute rezultate kod robotiziranog zavarivanja zaslužne su razne vrste senzora i dodatnih osjetila, algoritmi za prepoznavanje oblika, laserski daljinomjeri, razni tipovi laserskih i video kamera, kao i elementi umjetne inteligencije kojima se opremaju roboti odnosno robotske stanice. Navedeni elementi ključni su čimbenici za uspješno robotizirano zavarivanje od jednostavnih pa sve do složenih zadataka [3].

2. TEHNOLOGIJA PROCESA MAG ZAVARIVANJA

2.1. Općenito o MAG postupku zavarivanja

MAG postupak zavarivanja (engl. *Metal Active Gas*) je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom žicom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (najčešće ugljikov dioksid CO_2) ili u plinskoj smjesi (najčešće argon + ugljikov dioksid, argon + ugljikov dioksid + kisik). Kod MAG postupka zavarivanja električni luk održava se između taljive kontinuirane elektrode u obliku žice (u pravilu spojene na + pol izvora istosmjerne struje) i osnovnog materijala (Slika 2.). Toplina električnog luka osigurava da dođe do taljenja taljive elektrode i osnovnog materijala. Taljiva žica predstavlja dodatni materijal odnosno, taljenjem žice popunjava se prethodno pripremljen žlijeb na osnovnom materijalu [4,5].



Slika 2. Održavanje električnog luka između elektrode i osnovnog materijala [6]

Sustav zaštitnih plinova koji se koriste kod ovog procesa ima značajan utjecaj na stabilnost električnog luka, prijenos metala i prskanje. Najčešće u situacijama kada se očekuje lijep estetski izgled zavara, a da se pritom ostvari i dobra zavarljivost, MAG postupak zavarivanja izvodi se u plinskoj smjesi sa približno 80% argona i 20% CO_2. Zavarivanje kratkim električnim lukom daje najmanji unos topline u zavareni spoj što pogoduje zavarivanju tankih limova, dok impulsno zavarivanje osigurava zavarivanje u svim položajima bez rasprskavanja kapljica [4,5].

2.2. Tehnološki čimbenici kod MAG zavarivanja

Parametri koji bitno utječu na izgled, oblik i kvalitetu zavarenog spoja MAG postupkom su [3]:

1. Jakost struje zavarivanja – I (A)
2. Napon električnog luka – U (V)
3. Brzina zavarivanja – v_{zav} (m/min)
4. Promjer žice – d (mm)
5. Duljina slobodnog kraja žice – $l_{skž}$ (mm)
6. Protok zaštitnog plina – Q (l/min)
7. Induktivitet – L (H)

Tablicom 1. pokazuje se na koji način je moguće postići željeni oblik zavara namještanjem parametara.

Tablica 1. Utjecaj parametara na oblik, kvalitetu i izgled zavarenog spoja [7]

Parametri zavarivanja	Promjena							
	Penetracija		Depozit		Nadvišenje		Širina	
	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Struja i brzina žice	↑	↓	↑	↓	↑	↓	*	*
Napon	+	+	*	*	*	*	↓	↑
Brzina zavarivanja	+	+	*	*	↓	↑	↑	↓
Promjer žice	↓	↑		↑	*	*	*	*
Zaštitni plin % CO_2	↑	↓	*	*	*	+	↑	↓
Kut nagiba pištolja	Prednja Strana	Stražnja strana	*	*	*	*	Stražnja strana	Prednja Strana

* nema efekta ↑ povećanje

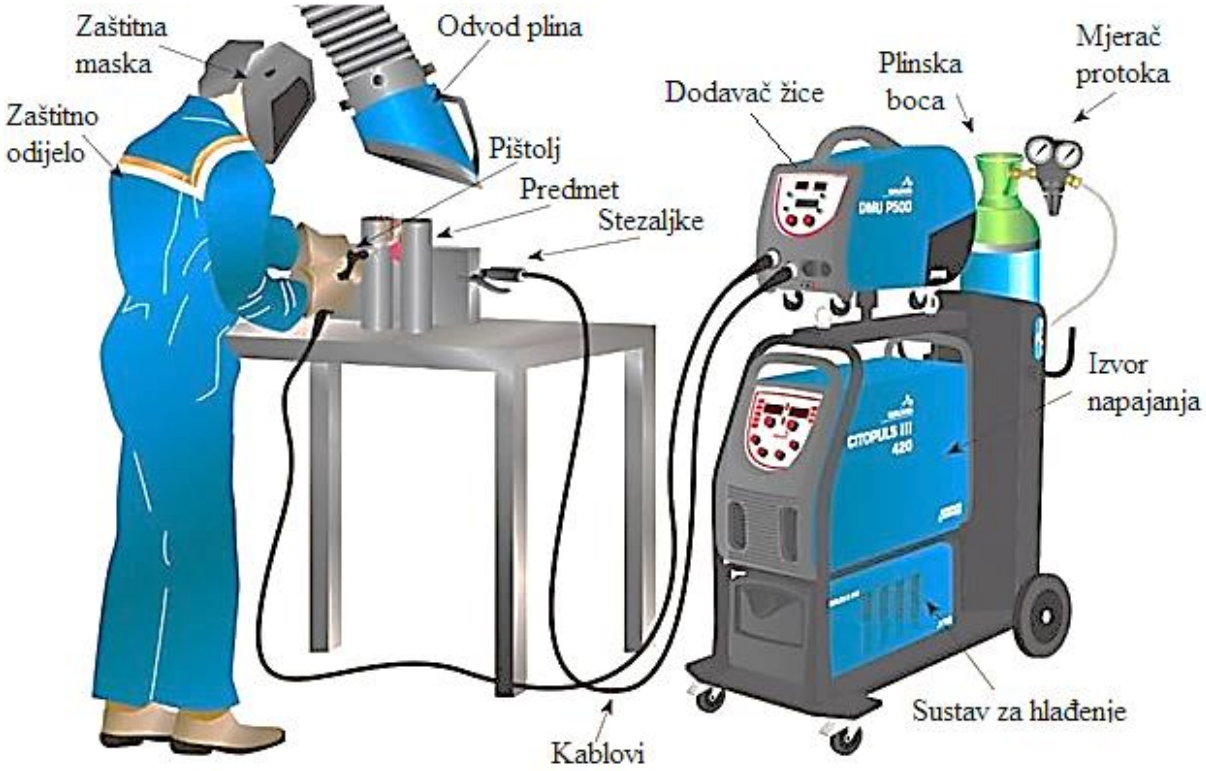
\+ mali efekt ↓ smanjenje

2.3. Prednosti i nedostaci kod MAG postupka zavarivanja

Prednosti MAG postupka zavarivanja su sljedeće [8,9]:

1. Svestranost postupka – mogućnost zavarivanja većine materijala (najčešće ugljični i niskolegirani čelici, aluminij i njegove legure, nehrđajući čelici), zavarivanje u svim položajima, zavarivanje širokog raspona debljina materijala, mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
2. Visok stupanj produktivnosti i učinkovitosti – kontinuirano dovođenje žice, zavarivači mogu raditi brže i čišće jer ne moraju stalno mijenjati elektrodu (elektroda ima oblik žice) i skidati trosku
3. Mogućnost podešavanja parametara i načina prijenosa materijala,
4. Postizanje visokokvalitetnih zavara – zbog prisustva zaštitnog aktivnog plina, zavar je zaštićen od oksidacije i ne postoji mogućnost zadržavanja troske u materijalu. Zavar je visoke čvrstoće i gotovo da nije potrebna dodatna obrada,
5. Pogodnost za poluautomatski (dodavanje žice mehanizirano a vođenje pištolja ručno), automatski (potpuno mehanizirano) i robotizirani način rada.

Na slici 3. prikazan je primjer poluautomatskog MAG zavarivanja.



Slika 3. Primjer poluautomatskog MAG zavarivanja [10]

Nedostaci MAG postupka zavarivanja su sljedeći [8,9]:

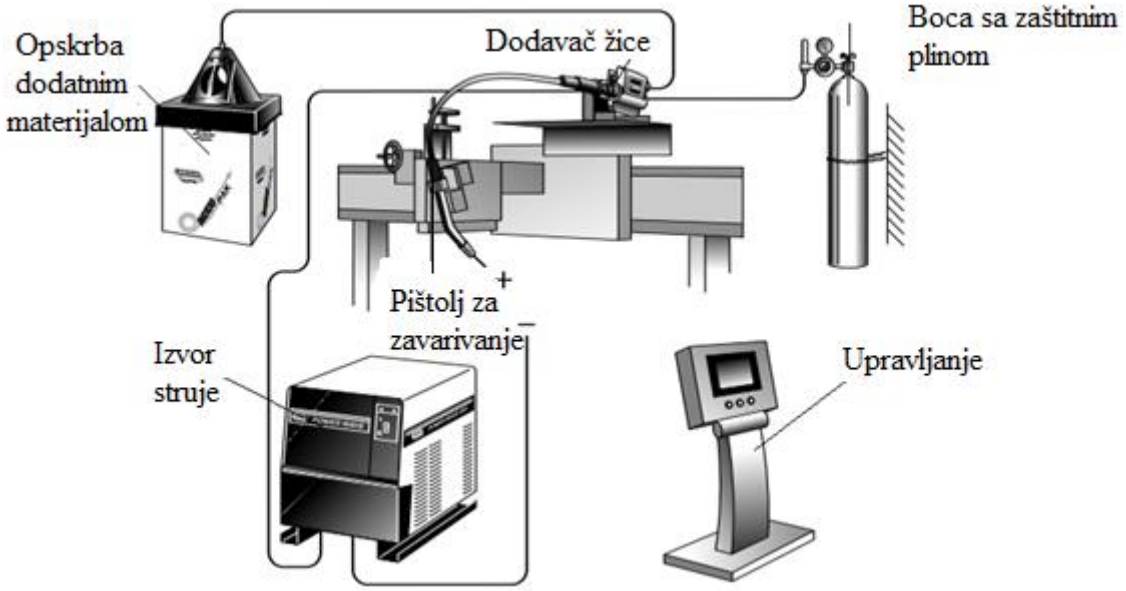
1. Složena oprema – uređaj se sastoji od izvora struje, sustava za hlađenje, polikabela, automatskog dodavača žice, mikroprocesorskog upravljanja i slično.
2. Ograničenost rada – zbog složenosti uređaja žrtvuje se prenosivost opreme. Također, rad na terenu je otežan i ne preporuča se zbog vjetra koji bi otpuhao zaštitni plin i na taj način direktno utjecao na kvalitetu zavara.
3. Skupo održavanje – visoki troškovi održavanja zbog dodatnih elektroničkih komponenti.

2.4. Zahtjevi za automatsko i robotizirano MAG zavarivanje i njihova usporedba

Da bi se postupak zavarivanja mogao automatizirati odnosno robotizirati potrebno je zadovoljiti osnovne uvjete [11]:

- Stabilan električni luk i kvalitetan prijenos materijala
- Intermitencija
- Hlađenje pištolja za zavarivanje
- Robustan i pouzdan sustav za dovod žice
- Dobra regulacija i kontrola električnog luka
- Adekvatna priprema
- Organizirana radna okolina – odstupanja u dimenzijama radnih komada
- Roboti – primjena senzora (taktilni, elektrolučni, laserski, vizijski)

Na slici 4. prikazan je primjer automatiziranog MAG postupka zavarivanja.



Slika 4. Automatizirani MAG postupak zavarivanja [12]

Zahtjevi i mogućnosti između automatiziranog i robotiziranog sustava MAG zavarivanja su slični ali postoje među njima i bitne razlike [13]:

- Robotizirani sustav omogućuje fleksibilnu automatizaciju zavarivanja (zavarivanje s mogućnošću podešavanja različitih parametra zavarivanja na više radnih mjesta, relativno brzu i jednostavnu mogućnost preprogramiranja nove putanje gibanja pištolja ukoliko dođe do promjene oblika proizvoda)
- Namjenski sustavi za automatizirano zavarivanje ne omogućuju fleksibilnost (prilagođeni su za visokoserijsku proizvodnju za isti tip proizvoda, promjena oblika proizvoda u pravilu nije moguća što znači dugotrajno preoblikovanje naprave)

Tablica 2. prikazuje usporedbu robotiziranog i automatiziranog sustava za zavarivanje.

Tablica 2. Usporedba robotiziranog i automatiziranog sustava [13]

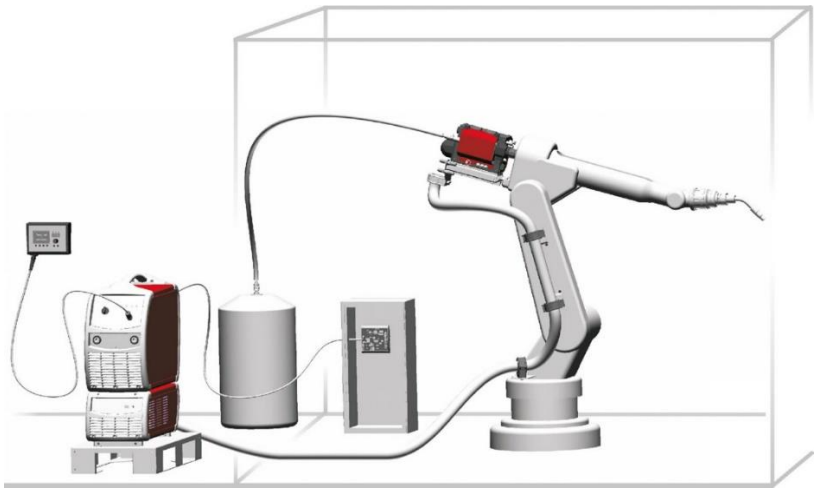
Zahtjevi	**Robotizacija**	**Automatizacija**
Maksimalna kvaliteta zavara i:	DA	DA
- optimalno podešavanje parametara zavarivanja	DA	DA
- jednostavna korekcija parametara zavarivanja	DA	DA
Visoka produktivnost i:	DA	DA (više glava)
- točnost obratka i preuzimanje	DA	DA
- fleksibilne produkcijske linije	DA	NE
Fleksibilna produkcija i:	DA	NE
- jednostavna posluga	DA	DA
- jednostavno održavanje	DA	DA
Visoka iskoristivost	DA	DA
Visoka kvaliteta	DA	DA
Visoka fleksibilnost	DA	NE
Minimalno vrijeme pripreme za drugi proizvod	DA	NE
Ergonomija i sigurnost radnika	DA	DA

3. ROBOTIZIRANO MAG ZAVARIVANJE

Nakon Drugog svjetskog rata, pojavom vremenskih programatora (*timeri*) u elektromehaničkoj verziji (*releji*), započeo je intenzivan razvoj i korištenje automatiziranog postupaka zavarivanja. Kasnije se programatori pojavljuju u elektroničkoj verziji, a funkcija im je upravljanje električnim veličinama poput doziranja energije na mjesto zavara [11].

Sredinom 60-tih godina primjena automata za zavarivanje postala je svestranija. Započeli su se primjenjivati za automatsko upravljanje mehaničkim veličinama (pozicioniranje, brzina gibanja). To je rezultiralo automatskim upravljanjem pištolja ili elektrode u odnosu na izradak [3].

Krajem 70-tih godina dolazi je do naglog razvoja mikroračunala i sofisticiranih robota, što omogućuje izradbu prvih robotiziranih zavarivačkih stanica (Slika 5.). Proces zavarivanja vodi upravljački uređaj. Osim električnim i mehaničkim veličinama moguće je upravljanje i različitim pomoćnim veličinama. Takva proizvodnja je gotovo potpuno automatizirana. Jedini razlog da ne postane potpuno automatizirana je ručno postavljanje i vađenje radnog komada[3].

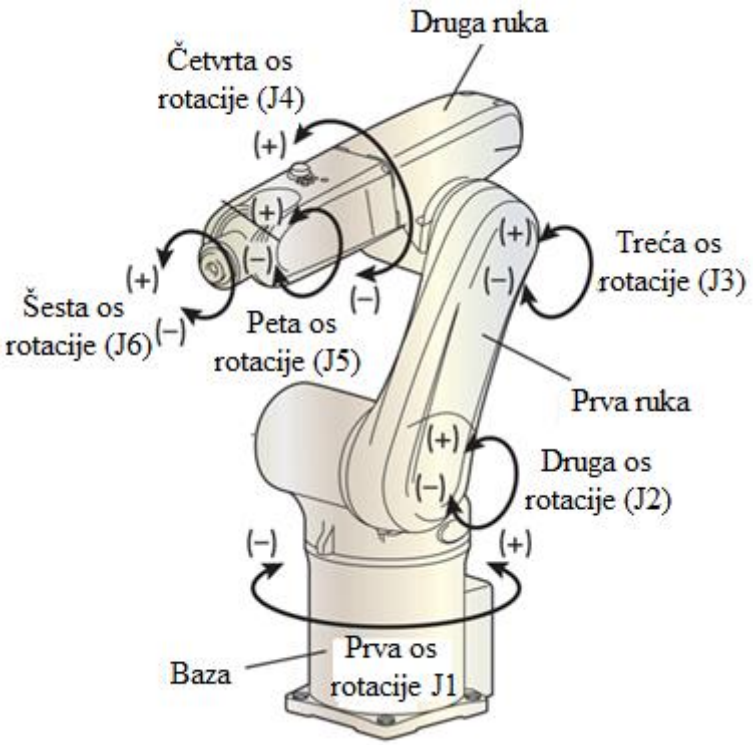


Slika 5. Robotizirana zavarivačka stanica [14]

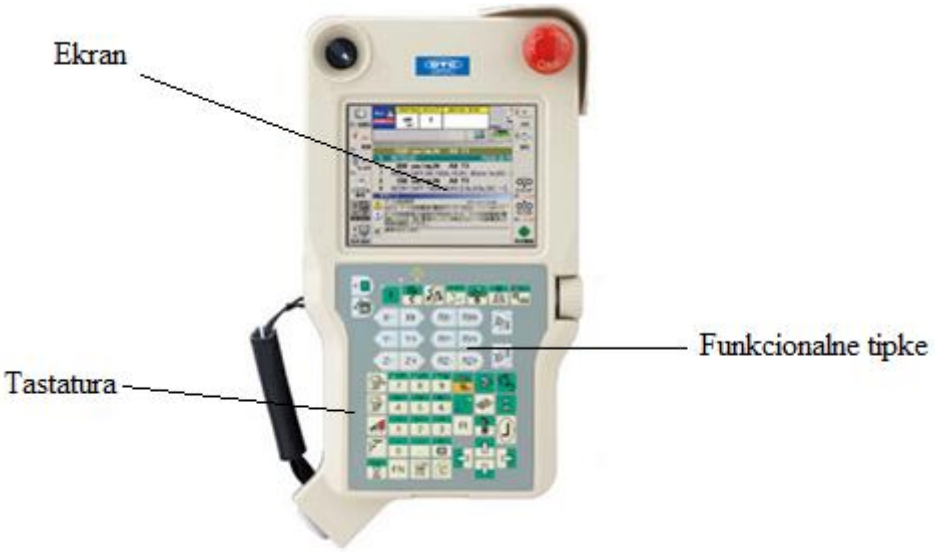
Danas je zavarivanje sastavni dio napredne industrijske proizvodnje, a robotizirano zavarivanje smatra se glavnim simbolom suvremene tehnologije zavarivanja. U najranijim primjenama robotiziranog zavarivanja tzv. sustava prve generacije robotskih zavarivanja, zavarivanje se provodilo u dva prolaza. Prvi prolaz sudjeluje u učenju geometrije pripreme spoja, a zatim slijedi drugi prolaz u kojem slijedi zavarivanje. U drugoj generaciji robotiziranog zavarivanja, istovremeno se u stvarnom vremenu odvija učenje geometrije pripreme spoja i zavarivanje. Najnovija tehnologija koja ujedno predstavlja i treću generaciju robotiziranog zavarivanja, u kojoj sustav ne samo da djeluje u stvarnom vremenu, nego i uči brzo mijenjajući geometriju oblika pripreme spoja tijekom rada u nestrukturiranom okruženju [15].

3.1. Robotizirana zavarivačka stanica

Glavna komponenta robotizirane zavarivačke stanice je robot. Robot je upravljan s najčešće šest osi (Slika 6.). Na vrh ruke robota montiran je pištolj za zavarivanje. Osim robota, vrlo važne komponente stanice su manipulator sa steznim napravama za pričvršćivanje radnog komada i računalo kojim se upravlja gibanjem robota i manipulatora. Privjesak za učenje sastoji se od ekrana, tastature i velikog broja funkcionalnih tipki (Slika 7.) [3].

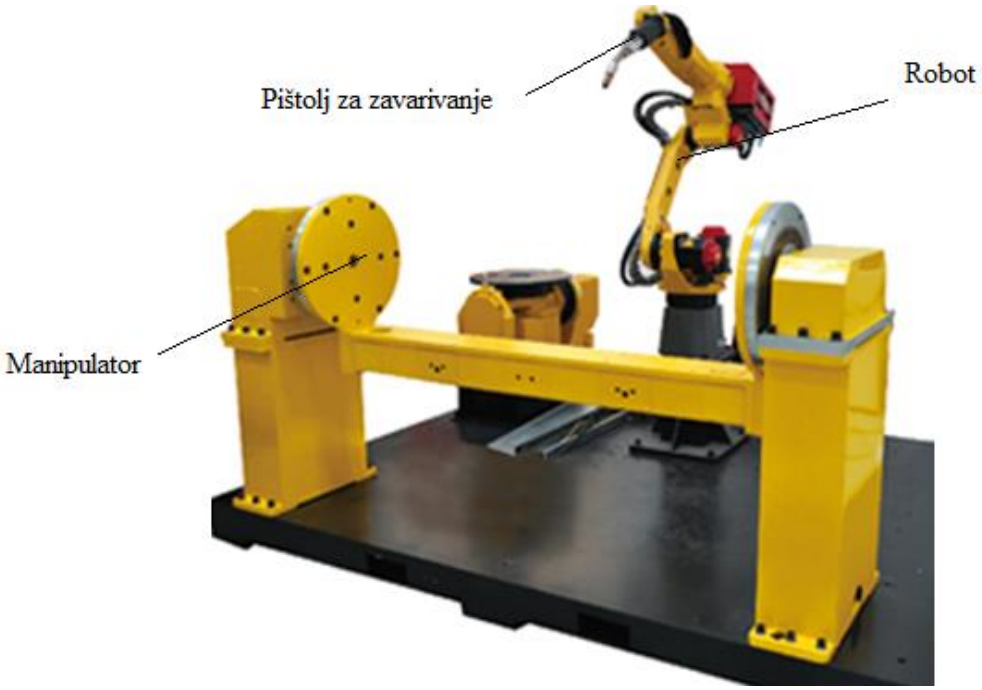


Slika 6. Robot - šest stupnjeva slobode gibanja [16]



Slika 7. Privjesak za učenje [17]

Na slici 8. prikazana je robotizirana zavarivačka radna stanica s jednim manipulatorom.



Slika 8. Robotizirana zavarivačka stanica s manipulatorom [18]

Slika 9. prikazuje robotiziranu radnu stanicu koja posjeduje dvije palete sa steznim napravama, gdje se pričvršćuje radni komad. Ovakva izvedba vrlo je praktična jer omogućava maksimalno iskorištenje radnog vremena robota. Za vrijeme dok robot na jednoj paleti izvodi zavarivanje, na drugoj paleti operater vadi gotov predmet i postavlja novi radni komad za zavarivanje. Također, stanica se sastoji i od sigurnosne ograde koja štiti osoblje [11].

Slika 9. Robotizirana zavarivačka stanica s dvije palete i steznim napravama [19]

3.2. Programiranje robota

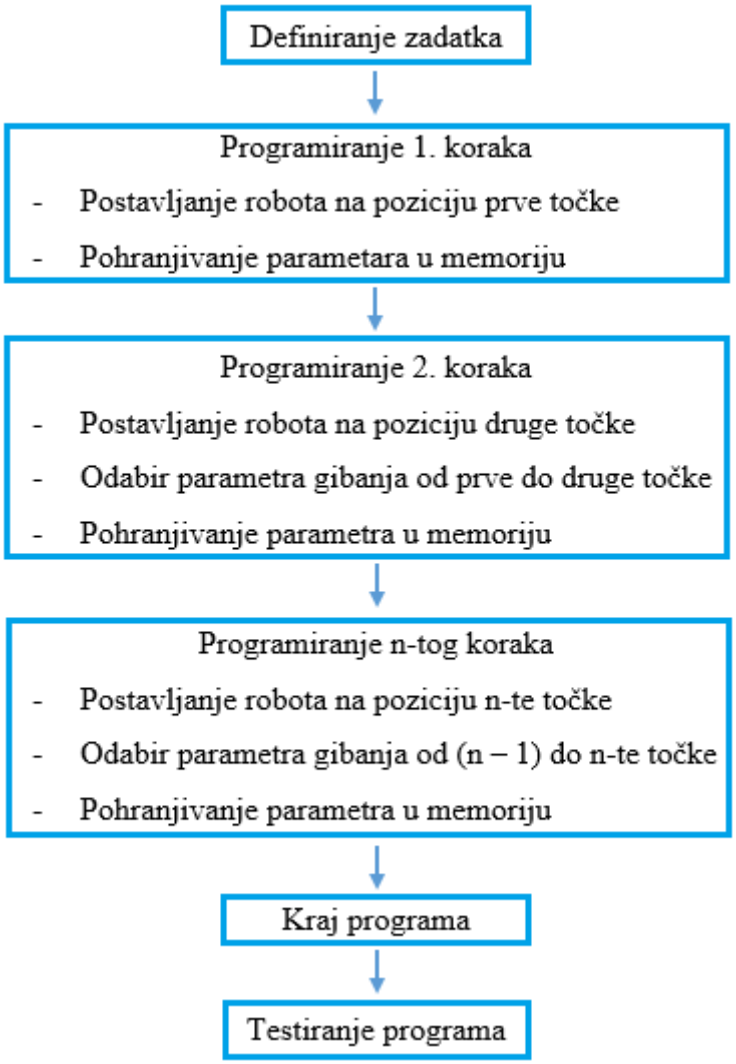
U industrijskoj primjeni robota postoje dvije osnovne metode programiranja robota [3]:

- *On – line* programiranje
- *Off – line* programiranje

3.2.1. *On – line* programiranje

Najlakši način za programiranje robota je tzv. ručno programiranje robota izravno na njegovom radnom položaju. Često se upotrebljava i izraz „*teach in*“ metoda programiranja (učenje robota). Ova metoda dijeli se na izravno i neizravno učenje robota [20].

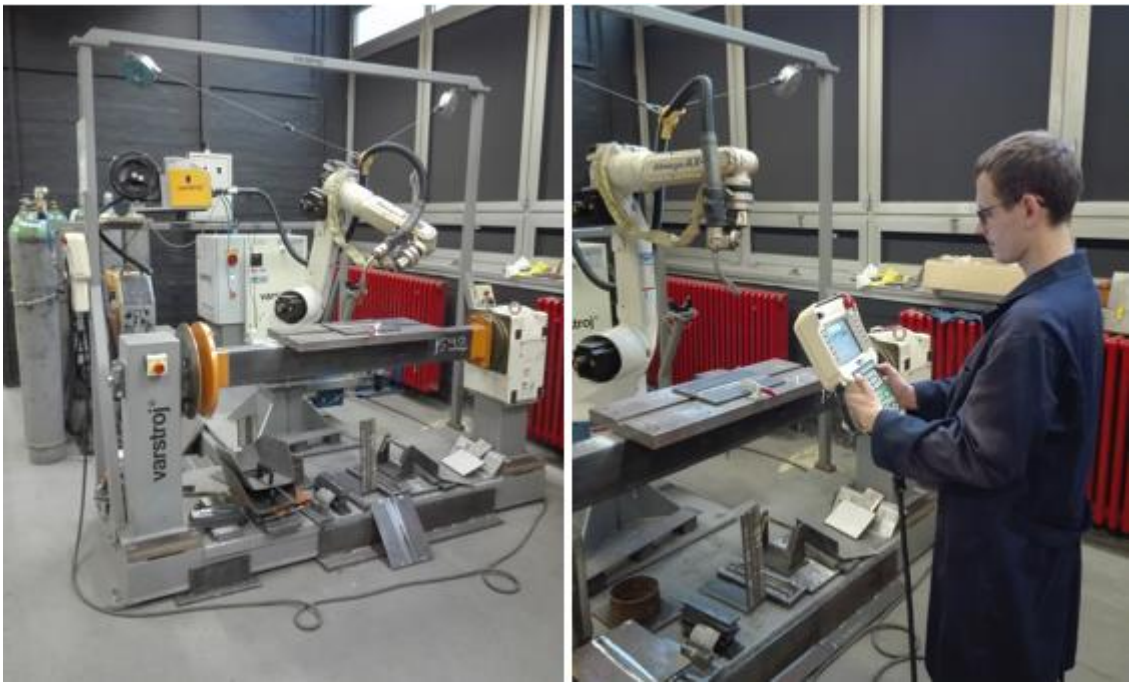
Slika 10. prikazuje blok dijagram „*teach in*“ metode programiranja robota.



Slika 10. Blok dijagram "*teach in*" metode programiranja robota [20]

Rijetko korištena izravna metoda učenja robota izvodi se tako da operater ručno pomiče ruku robota preko željenih točaka u prostoru. Zatim se u memoriju pohranjuju pozicije tih točaka što omogućuje kasnije kretanje robota po putanji definiranoj tim točkama. Kod neizravnog učenja robota operater pomoću kursorskih tipki na privjesku za učenje pomiče robotsku ruku preko željenih točaka u prostoru. Uz koordinate točaka u memoriju se pohranjuju i željeni parametri gibanja (linearno, kružno,…) te parametri zavarivanja. Na ovaj način se programiraju kratki i jednostavni zadaci. Najčešće ovakvi programi imaju vrlo mali broj točaka, dok su putanje gibanja pištolja za zavarivanje vrlo jednostavne. Nakon programiranja provodi se testiranje programa te ispravljanje eventualnih pogrešaka, a jednom pravilno ispisan program može se pohraniti i ponavljati beskrajno mnogo puta. Osoblje kod *on – line* programiranja ne treba biti visokoobrazovano u području robotike. Dovoljna je dobra uvježbanost u programiranju i poznavanje tehnologije zavarivanja (brzina zavarivanja, brzina žice, struje, napona, orijentacije pištolja i sl.). Najveći nedostatak kod *on – line* metode programiranja je neproduktivnost za vrijeme programiranja. Ukoliko se vrši programiranje složenijeg komada, programiranje postaje zahtjevnije i dugotrajnije, a samim time postoji i veća mogućnost za pogrešku [3,7,20].

Na slici 11. prikazan je primjer *on – line* metode programiranja robota.

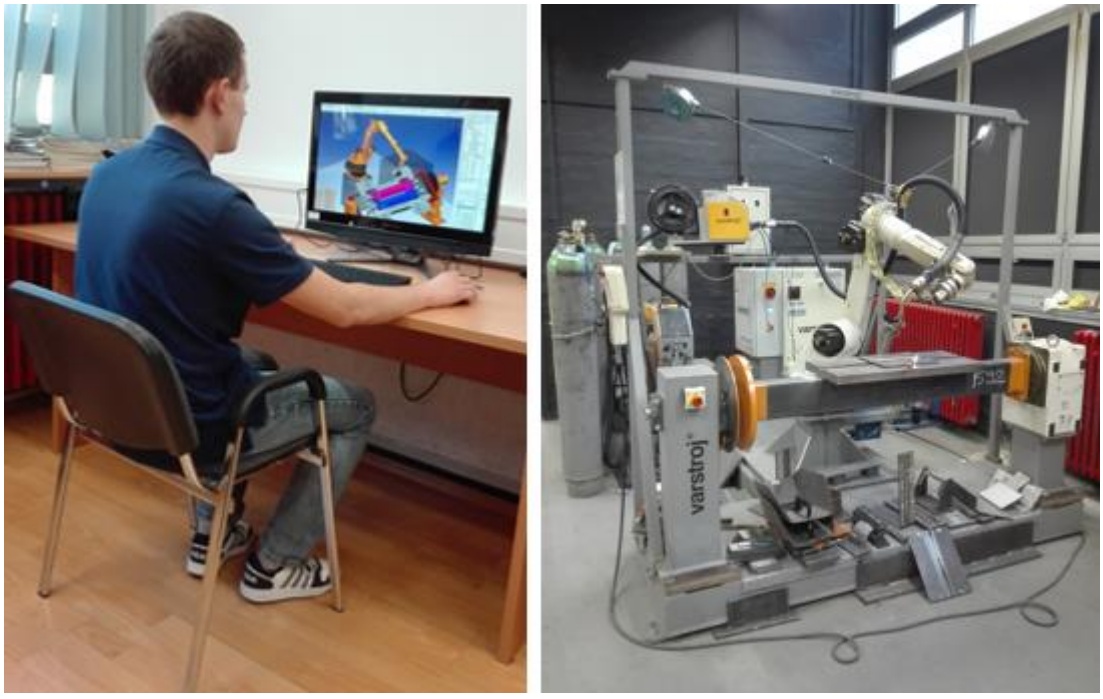


Slika 11. *On - line* metoda programiranja robota

3.2.2. *Off – line* programiranje

Prilikom programiranja složenih projekata gdje je riječ o programu s velikim brojem točaka, klasično *on – line* programiranje nije praktično niti moguće te su iz tog razloga razvijeni razni robotski programski jezici koji omogućuju *off – line* programiranje. Najveća prednost programiranja *off – line* metodom je programiranje bez zaustavljanja proizvodnje na mjestu neovisnom o robotu. Glavne prednosti ove metode su točnost i brzina programiranja putanje robotskog manipulatora, posebice kod kompleksnijih radnih komada. Velika prednost je i mogućnost simultanog gibanja više robotskih mehanizama unutar jednoga robotskog sustava. Danas se vrlo često programski sustavi za *off – line* programiranje povezuju izravno s CAD sustavima. Na taj način moguće su grafičke simulacije i provjere programa čime se korisniku omogućuje optimiziranje projektiranja robotske stanice i procesa koji se u njoj odvijaju. Uvozom CAD modela u programske alate korisnik dobiva trodimenzionalni prikaz programskog procesa te neograničenost u programiranju s velikom vjernosti stvarnoj konfiguraciji robotske stanice. Grafičko orijentirano *off – line* programiranje zahtijeva stručni kadar, jer uz tehnologiju zavarivanja potrebno je i znanje iz područja robotike, poznavanje CAD-a i osnova programiranja u nekom programskom jeziku [3,20,21,22].

Na slici 12. prikazan je primjer *off – line* programiranja robota.



Slika 12. *Off - line* programiranje robota

Zbog male produktivnosti i zaustavljanja proizvodnje kod *on – line* programiranja te zbog visoke cijene modernih programskih sustava za *off – line* programiranje vrlo često se primjenjuje miješana metoda programiranja. Za ovakvu metodu programiranja karakteristično je da se dio programa vezan uz operacijski tok generira *off – line*, a dio programa vezan uz skup točaka u prostoru *on – line*. Programiranje pri kojem se program napisan pomoću *„teach in“* metode „prebaci“ u računalo, gdje se uz korištenje nekog od programskih paketa modificira spada u tzv. miješano programiranje [3]. Ovakvim načinom programiranja robot je kraće vrijeme zauzet nego kod *on – line* programiranja, ali se zahtijeva dodatni software i hardware (puno jeftiniji nego kod *off – line* programiranja), a vrijeme učenja programiranja je nešto duže nego kod *on – line*, a puno kraće nego kod *off – line* programiranja [20].

3.3. Inteligentni robot

Vrlo je teško i gotovo nemoguće predvidjet i identificirat sve situacije u kojima bi se robot mogao nalaziti tijekom izvršavanja zadatka. Stoga je potrebno da razvojni inženjer/programer odredi kategorije situacija i na taj način osigura robotu dovoljno inteligencije i sposobnosti za rješavanje problema bilo koje klase svoga programa. Primjerice, kada su situacije nejasne i neizvjesne, robot mora imati sposobnost sam procijeniti različite moguće radnje. Ako se robotski okoliš ne mijenja, robot dobiva model svog okruženja kako bi mogao predvidjeti ishod svojih postupaka. Međutim, dolazi li do promjene okoliša, robot bi trebao biti u stanju to naučiti. To je ujedno i jedan od preduvjeta koji zahtijevaju razvoj i ugrađivanje umjetne inteligencije (engl. *AI*) kojom bi robot bio u stanju samostalnog učenja, razmišljanja i rješavanja problema. Većina industrijskih robota za zavarivanje u praktičnoj proizvodnji i dalje rade na principu „učenja robota“ i nemaju automatske funkcije prilagodbe promjeni okoliša i neizvjesnim poremećajima. Kako bi se prevladala ovakva ograničenja, učinkovit pristup razvoju i poboljšanju inteligentne tehnologije robota za zavarivanje je u opremanju robotske stanice bogatom opremom senzora, vizualnog osvjetljenja, višestrukog očitavanja, prepoznavanja okoliša, praćenje geometrije žlijeba, inteligentni postupci kontrole u stvarnom vremenu za robusno zavarivanje i dr. U tu svrhu, razvoj inteligentne tehnologije za poboljšanje trenutne metode učenja ključan je za postizanje visoke kvalitete i fleksibilnosti očekivanih od zavarenih proizvoda. Očekuje se da će roboti preuzeti aktivnu ulogu u tehnologiji zavarivanja [15].

3.4. Problemi kod robotiziranog zavarivanja

Unatoč prednostima u korištenju robotiziranih sustava, javljaju se problemi koji se moraju pažljivo razmotriti [15]:

- konzistencija ponovljivosti potrebna za izradu proizvoda, koja se u nedostatku odgovarajuće kontrole može mijenjati zbog nepravilnog stezanja ili poremećaja uvjeta okoline kod procesa zavarivanja
- kod maloserijskog i srednjeg opsega proizvodnje, vrijeme i napor za programiranje robota za zavarivanje mogu biti poprilično visoki
- robotizirano zavarivanje zahtijeva pravilno oblikovanje spojeva, dosljedne uvjete zavarivanja i toleranciju razmaka ne više od 0,5 do 1 mm
- automatizacija zavarivanja robotiziranih sustava ima visoku početnu cijenu, pa je nužan točan izračun povrata ulaganja
- mogući nedostaci kvalificiranih zavarivača s potrebnim znanjem i obukom predstavljaju ograničenja
- za razliku od prilagodljivog ljudskog ponašanja, roboti ne mogu samostalno donositi korektne odluke i moraju se opremiti raznim senzorima i sustavima kontrole za donošenje odluke
- robotizirano zavarivanje se ne može lako provesti u nekim područjima kao što su zavarivanje tlačnih posuda, unutarnjih spremnika te zavarivanje brodskih tijela zbog ograničenog radnog prostora
- većina senzorskih inteligentnih sustava dostupnih na tržištu nije čvrsto integrirana s robotskim kontrolorom, što ograničava performanse robotskog sustava jer većina industrijskih robota nude samo oko 20 Hz povratnu petlju preko sučelja za programiranje. Rezultat toga je da robot ne može brzo odgovoriti na informacije senzora, što rezultira usporenom i ponekad nestabilnom izvedbom.

4. SENZORI KOD ROBOTIZIRANOG ZAVARIVANJA

Razvoj automatizacije i robotizacije procesa zavarivanja te otkrivanje novih i naprednih materijala zahtijeva sve veću potrebu za boljom kontrolom i osjetljivošću u tehnologiji zavarivanja. Naglasak se stavlja na preciznu kontrolu postupka zavarivanja kako bi se postigao željeni zavar u odnosu na produktivnost i kvalitetu. Prema tome, postoji potreba za različitim tehnologijama da precizno kontroliraju proces s obzirom na različite parametre kod zavarivanja. Pri tome vrlo važnu ulogu imaju senzori kao glavni izvor ulaza u upravljački sustav koji upravlja i kontrolira ponašanje te izlaz iz sustava zavarivanja [23].

Gledano općenito, većina robotiziranih postupka zavarivanja koji proizvode kontinuirani zavar temelji se na MIG/MAG postupku zavarivanja i to zbog samih prednosti ovih procesa. Korištenje senzora u ovom području nije novost jer se oni uspješno primjenjuju više desetaka godina. Nedostatak je taj da je primjena i korištenje senzora izrazito niska i skromna. Razvoj novih proizvoda kompleksnijeg geometrijskog oblika i suvremenih materijala zahtjeva primjenu napredne tehnologije, a samim time povećava se i potreba za senzorima. Rezultat toga je potreba za rad u vrlo uskom tolerantnom području. Stoga se potreba za senzorima povećava kako bi se mogli zadovoljiti zahtjevi novih procesa i specifikacija proizvoda. Jednostavno rečeno, primjena senzora kod robotiziranog zavarivanja raste proporcionalno sa zahtjevima kompleksnih proizvoda koji zahtijevaju veliku preciznost i točnost procesa [23].

Roboti za zavarivanje pretežno se implementiraju u automatizirane proizvodne procese, od kojih se većina koristi robotima za učenje. U ovakvim sustavima javlja se nekoliko problema [15]:

- promjena dimenzija radnog komada zahtijeva ponovno programiranje jer se tijekom zavarivanja program ne može prilagoditi i samostalno ispraviti,
- dolazi do poremećaja putanje ili oblika pripreme spoja uzrokovana slučajnim čimbenicima.

Navedeni problemi mogu se izbjeći upotrebom različitih vrsta senzora. Glavni zadatak upotrebe senzora kod robotiziranog zavarivanja je otkrivanje i mjerenje procesnih značajki i parametara, kao što su geometrija zglobova, geometrija i položaj pripremljenog žlijeba te nadzor procesa zavarivanja u stvarnom vremenu. Na taj način sustavu za kontrolu omogućuju se potrebne informacije za generiranje odgovarajućih akcija (korekcija putanje gibanja robotske ruke i sl.) kako bi se postigao željeni rezultat koji odgovara definiranim specifikacijama proizvoda [15,23].

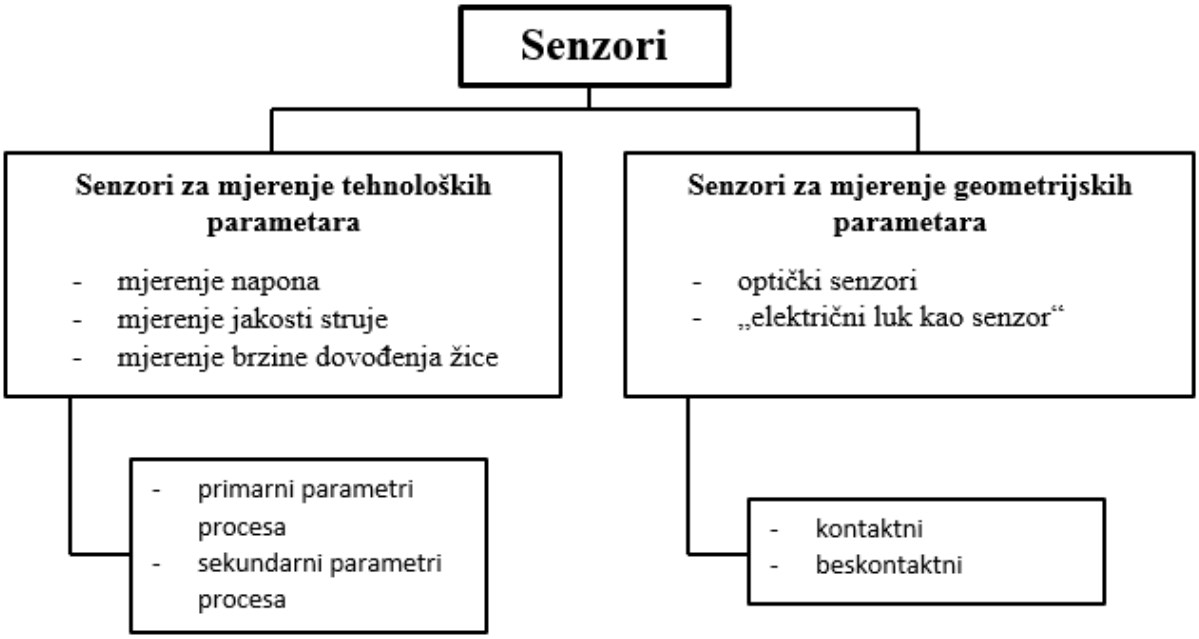
Uzimajući u obzir još jedan pristup, senzori se koriste kako bi se povećala fleksibilnost proizvodnje i omogućilo korištenje robota u malim serijama ili za pojedinačnu proizvodnu. To postavlja određene zahtjeve senzorima [24]:

- Prilikom programiranja putanje robota za zavarivanje, senzor bi trebao omogućiti kretanje robota po putanji bez dugotrajnog i detaljnog programiranja,
- Senzor treba pravilno reagirati na događaje u stvarnom vremenu tijekom zavarivanja i pokrenuti alternativne akcije te korigirati putanju ako se pojavi prepreka koja nije definirana u nominalnim podacima,
- Nadzor i kontrola robota pri izvršavanju procesa zavarivanja s ciljem povećanja robusnosti programa. To je osobito važno kad su u pitanju uske tolerancije ili ako je radni komad koji se zavaruje, netočno pozicioniran.

4.1. Podjela senzora

Najčešća podjela senzora kod robotiziranog zavarivanja je podjela senzora s obzirom na karakteristike koje mjere, dakle na tehnološke i geometrijske. Princip rada tehnoloških senzora temelji se na mjerenju parametara procesa zavarivanja da bi se osigurala stabilnost procesa i najčešće se koriste u svrhu kontrole i nadgledanja. Geometrijski orijentirani senzori osiguravaju robotu potrebne podatke vezane uz geometriju i oblik zavarenog spoja radi uspješnog praćenja žlijeba, čime se omogućuje korigiranje predprogramirane putanje sukladno geometrijskim odstupanjima [25].

Na slici 13. prikazana je podjela senzora.



Slika 13. Podjela senzora [25]

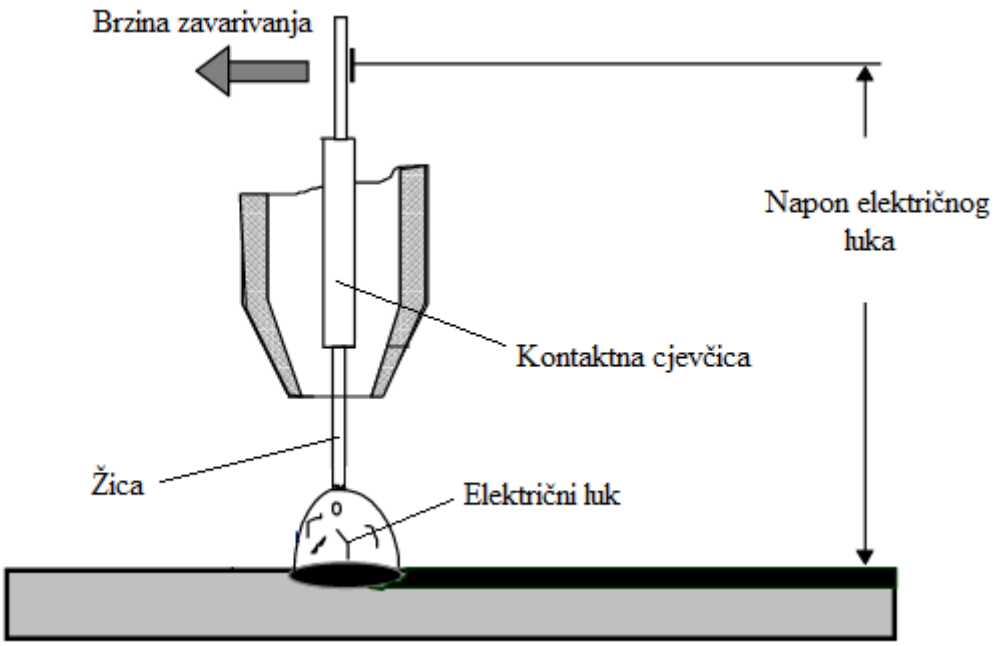
4.2. Senzori za mjerenje tehnoloških parametara

U ovom dijelu opisani su senzori koji mjere parametre: napon, jakost struje i brzinu dovođenja žice.

4.2.1. Mjerenje napona

Mjerenje napona trebao bi se izvoditi što je moguće bliže električnom luku. Dovod struje do žice vrši se preko kontaktne cjevčice te se to mjesto smatra najpovoljnijom pozicijom za mjerenja napona. U praksi, u proizvodnom okruženju vrlo je teško provest ovakvo mjerenje napona električnog luka jer se javljaju gubici. Između kontaktne cjevčice i vrha žice javlja se pad napona koji iznosi 0,3 V ovisno o svojstvima procesa. Prikladniji način za mjerenja napona je preko žice unutar sustava za dovođenje žice. Prilikom mjerenja vladaju velike struje u rasponu od 150 do 500 A. U slučaju da je senzor pogrešno postavljen na žicu, dolazi do značajnih induciranih napona, što rezultira pogrešne rezultate mjerenja [23,25].

Na slici 14. prikazana je skica mjerenja napona.



Slika 14. Napon električnog luka [26]

4.2.2. Mjerenje jakosti struje

Postoje dvije vrste senzora koji se koriste za mjerenje jakosti struje, a to su promjena struje (engl. *Current Shunt*) i Hallov efekt [23,25].

a) promjena struje - princip mjerenja izvodi se na način da se kroz otpornik pusti struja i mjeri pad napona kroz njega. Veliki nedostatak ove metode je osjetljivost na buku zbog malog signala napona [23,25].

Slika 15. prikazuje senzor na principu promjene struje.

Slika 15. Senzor na principu promjene struje (engl. *Current Shunt*) [27]

b) Senzor na principu Hallovog efekta – senzor se sastoji od kružne jezgre izrađene od lijevanog željeza kroz čiji prolaz prolazi kabel kojim teče struja. Unutar jezgre smješten je i sam uređaj za mjerenje, a čine ga pločica od silicija i dva para vodiča. Preko prvog para vodiča dovodi se namještena jakost struje do pločice. Nakon toga, uređaj reagira signalom na drugom paru vodiča proporcionalno magnetskom polju, a samim time i jakosti struje vodiča u polju. Prednost ovakvog senzora je što nema kontakta s vodičem i nema interferencije sa strujom iz izvora za zavarivanje. Ograničenje ovog senzora je propusnost od 100 kHz i uobičajena brzina odziva od 50 A/μs [23,25].

4.2.3. Mjerenje brzine dovođenja žice

Brzina dovođenja žice važan je parametar za održavanje stabilnosti procesa zavarivanja. Prilikom definiranja procesa podešavaju se parametri napon i jakost struje. Međutim, jakost struje povezana je s određenom brzinom dovođenja žice. Stoga prilikom podešavanja napona i jakosti struje, brzina dobave žice automatski se prilagođava promjenama. Stabilnost procesa se postiže održavanjem brzine dovođenja žice jednakoj nominalnoj brzini [23,25].

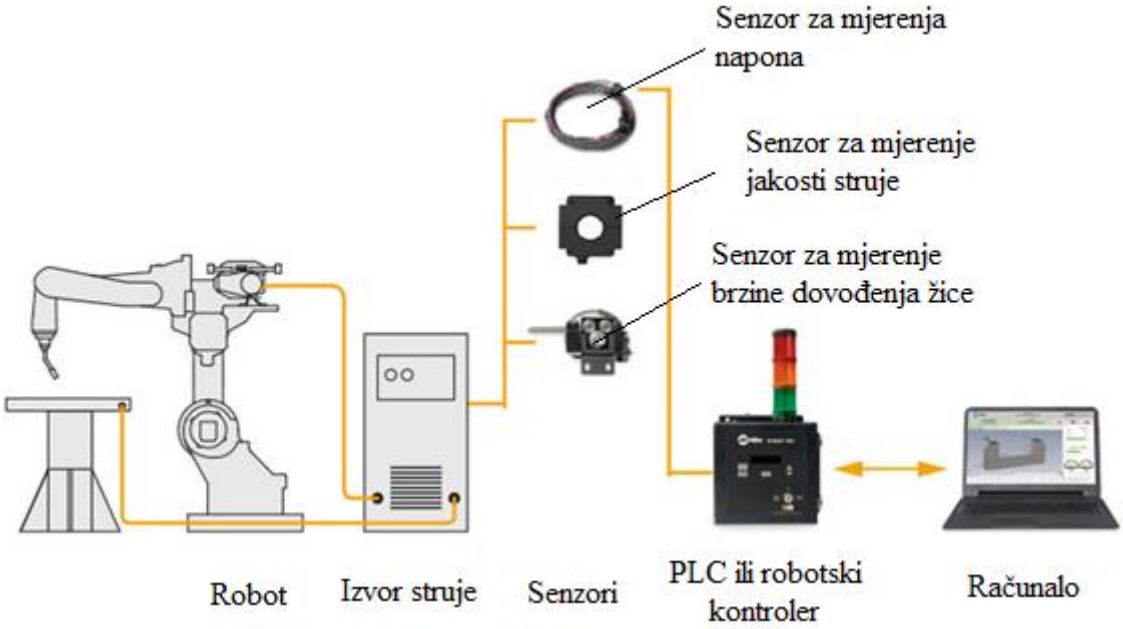
Sustav za dobavu žice kod većine robotiziranih stanica nalazi se u neposrednoj blizini robota za zavarivanje čime je omogućeno pouzdano i sigurno dovođenje žice. No, postoje situacije u pogonima gdje se sustav za dovođenje žice nalazi na većoj udaljenosti od robota, pa

u nekim dijelovima kablova kroz koje se dovodi žica može doći neželjenog savijanja žice. Tada dolazi do poremećaja u brzini dobave žice pa samim time proces postaje nestabilan. Stoga je poželjno kontroliranje brzine dovođenja žice, a ono se u praksi ostvaruje postavljanjem senzora na kolut sustava za dovođenje žice. U laboratorijskim uvjetima, brzina dobave žice može se mjeriti i na kontaktnoj cjevčici [23,25].

Na slici 16. prikazan je senzor za mjerenje brzine dovođenja žice.

Slika 16. Senzor za mjerenje brzine dovođenja žice [28]

Na slici 17. prikazana je uobičajena robotizirana stanica opremljena senzorima za mjerenje tehnoloških parametra.



Slika 17. Robotizirana stanica opremljena tehnološkim senzorima [29]

4.3. Senzori za mjerenje geometrijskih parametara

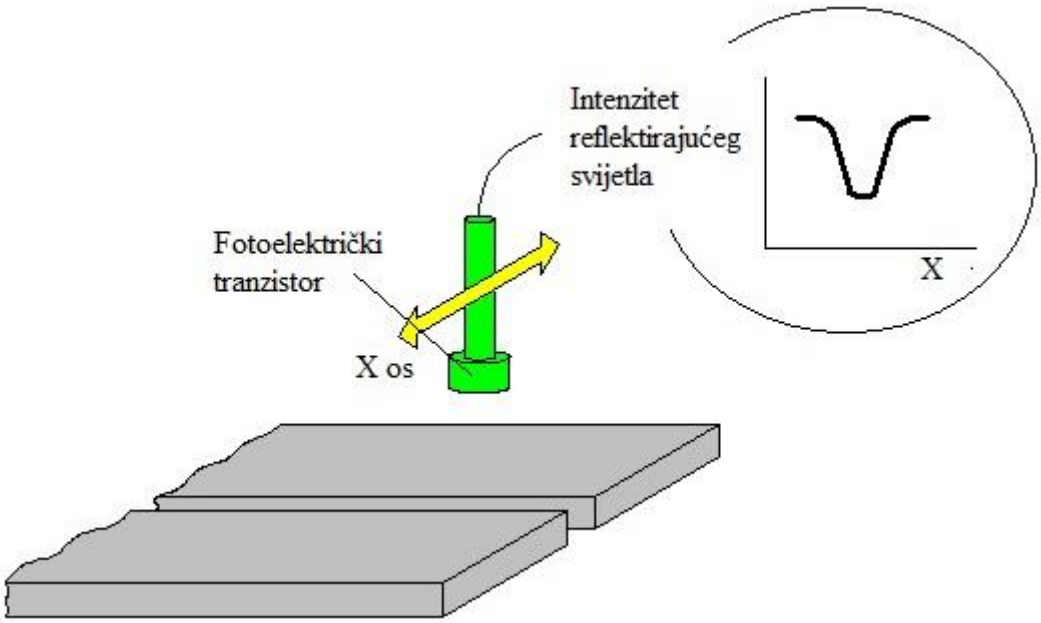
Senzori za mjerenje geometrijskih veličina pružaju informacije o zavarivanju koje se odnose na geometriju zavarenog spoja. Takve informacije od izuzetne su važnosti jer omogućuju praćenje spoja, a koriste se i za kontrolu kvalitete procesa zavarivanja. Međutim, veliki izazov se postavlja na same senzore tijekom procesa zavarivanja zbog agresivne okoline s izrazito visokim temperaturama u kojoj se nalaze. Osim toga dolazi i do raspršivanja tekućeg metala, pojave intenzivne svjetlosti, javljaju se visoke vrijednosti jakosti struje i sl. Stoga se danas prvenstveno najviše koriste optički senzori i senzori električnog luka [25].

4.3.1. Optički senzori – vrste, značajke, ograničenja i primjena

S obzirom na način mjerenja, optički senzori za elektrolučno zavarivanje dijele se na točkasti senzor, linijski senzor i prostorni senzor.

a) Točkasti senzor

Kao što je prikazano na slici 18., točkasti senzor namijenjen je za praćenje utora, pomicanjem fotoelektričkog senzora, dobivajući intenzitet reflektirajućeg svjetla od površine. Cilj je da se shvati položaj i oblik žlijeba. Međutim, pouzdanost ovakvog postupka nije visoka pa se danas ovakvi senzori rijetko koriste [30].

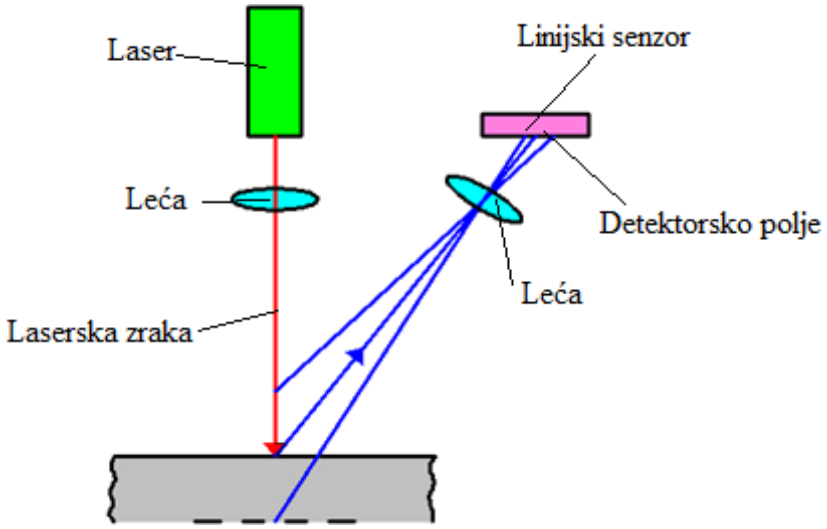


Slika 18. Točkasti senzor [30]

b) Linijski senzor

Linijski senzor detektira reflektiranu lasersku svijetlost od osnovnog materijala u jednodimenzijskom obliku. Poluvodički laser koristi se kao izvor svjetlosnog osvjetljenja i usmjeren je na objekt. Na taj način mjeri se udaljenost između senzora i predmeta, te ako je kut između ulazne i reflektirane zrake veliki, predmet je blizu senzora, a u suprotnom kada se kut smanjuje predmet se udaljava. Ova metoda mjerenja udaljenosti naziva se još i metoda triangulacije i vrlo je važna kod procesa zavarivanja za praćenje i mjerenje geometrije spoja [25,30].

Na slici 19. prikazana je metoda triangulacije koja se koristi za praćenje i mjerenje geometrije spoja kod procesa zavarivanja.



Slika 19. Metoda triangulacije [25]

Detekcija udaljenosti provodi se mjerenjem fokusirane reflektirane zrake na detektorsko polje CCD ili CMOS senzora (riječ je o digitalnim senzorima) [30].

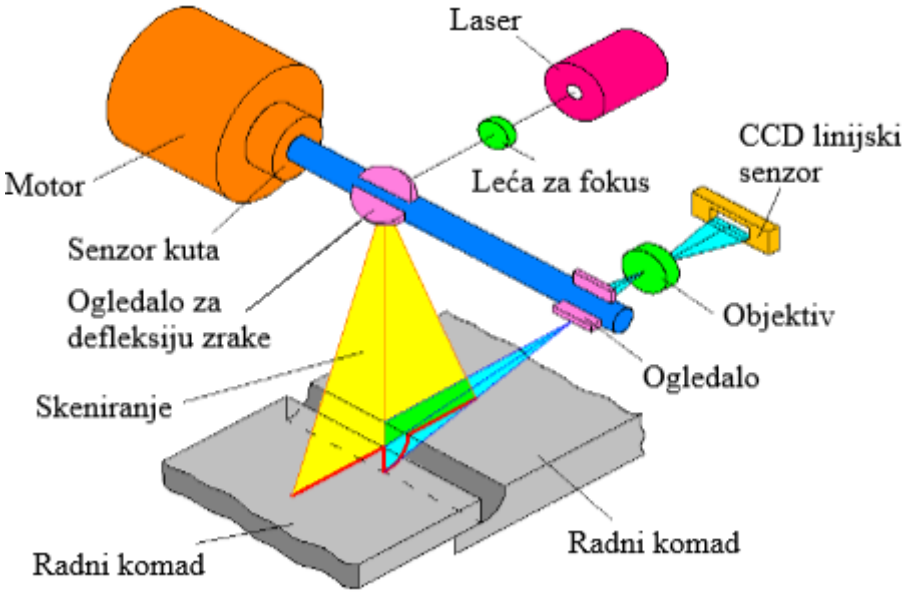
CCD (engl. *charge – coupled device*) senzor ima jednostavniju strukturu na razini pojedinačnog piksela, što olakšava proizvodnju i čini je jeftinijom. Ima veću osjetljivost na svijetlost i dinamički raspon, a na razini piksela, manju buku i bolju kvalitetu snimljenih podataka [31].

CMOS (engl. *complementary metal oxide semiconductor*) ima složeniju strukturu na razini pojedinačnog piksela budući da u samom pikselu postoji više elektronskih elemenata nego kod CCD senzora. Međutim, ti elektronički elementi zauzimaju prostor i time utječu na hvatanje količine svijetlosti i kvalitetu prikupljenih podataka, na razini pojedinačnog piksela. Glavna prednost CMOS senzora, uz CCD senzor, je niža potrošnja energije, brži rad sustava i bolja kvaliteta slike u području digitalnog šuma generiranog tijekom prijenosa signala. Unatoč

tome što CCD senzori imaju manje buke kod nominalne osjetljivosti od CMOS, CMOS senzori su puno bolji zbog sustava pojačanja signala, što se u praksi odražava boljom kvalitetom slike s visokim ISO vrijednostima [31].

Prilikom skeniranja geometrije spoja, određuje se 2D slika profila spoja. Pomicanjem robota postiže se 3D opis geometrijskog modela spoja [25].

Slika 20. prikazuje praćenje spoja linijskim senzorom po principu skeniranja i metode triangulacije.



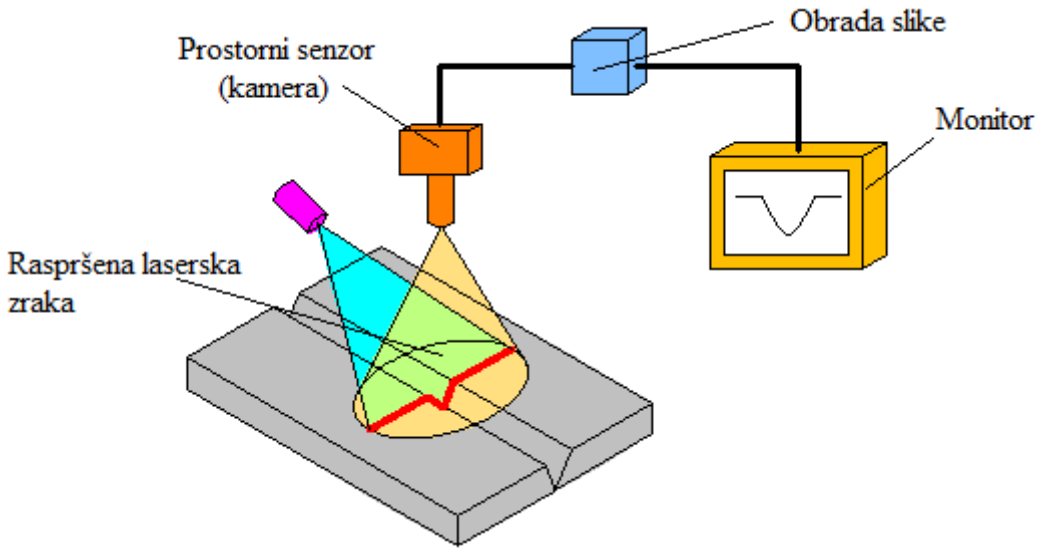
Slika 20. Praćenje spoja kod procesa zavarivanja [25]

Kod robotiziranog zavarivanja debelih ploča, zavarivanje se provodi u nekoliko prolaza npr. jedan korijenski prolaz i nekoliko prolaza za popunjavanje zavarenog spoja. U takvim situacijama, laserski senzor montira se na glavu pištolja. Gibanjem robota vrši se praćenje zavarenog spoja i bilježi se geometrija zavara i put zavarivanja. Svakim sljedeći prolazom, zavarivanje se može ostvariti na temelju stvarne geometrije zavara [23]. Na slici 21. prikazan je primjer opremanja pištolja za zavarivanje laserskim senzorom za praćenje spoja.

Slika 21. Senzor za praćenje spoja instaliran za glavu pištolja za zavarivanje [32,33,34]

c) Prostorni senzor

Prostorni senzor detektira reflektiranu svijetlost od osnovnog materijala u dvodimenzionalnom obliku. Općenito, postoje dvije metode za praćenje procesa zavarivanja koje imaju široku primjenu. Laserska metoda radi na principu raspršivanja laserske svjetlosti po osnovnom materijalu pri čemu senzori detektiraju lasersko zračenje i na taj način prate oblik spoja (Slika 22.). Do raspršenja laserske zrake dolazi promjenom izlazne laserske diode linijskog oblika s cilindričnim oblikom [30].



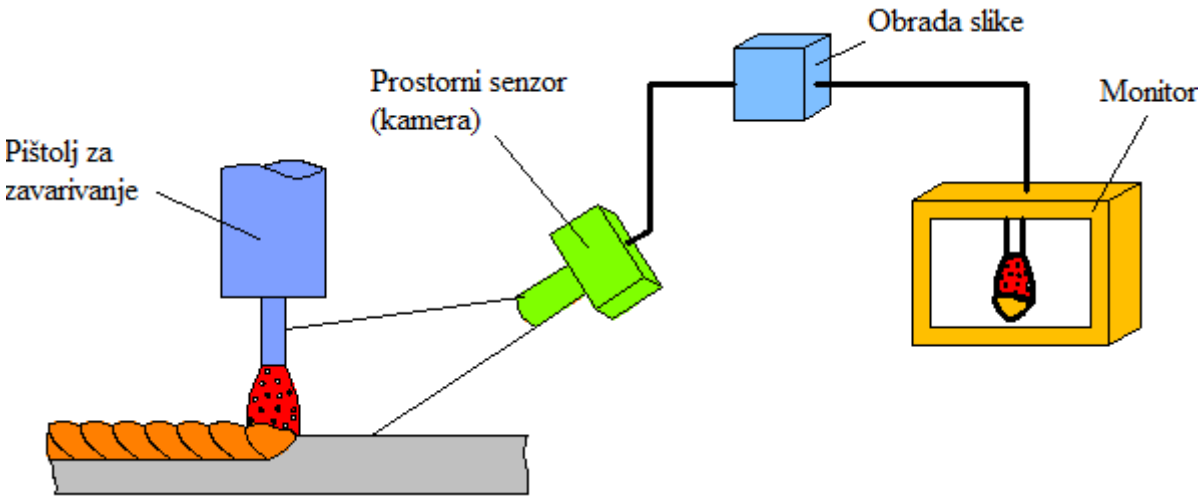
Slika 22. Primjena prostornog senzora – laserska metoda [30]

Vizualna metoda tijekom procesa zavarivanja koristi brze kamere kojima se snima i obrađuje slika. Informacije dobivene na temelju obrade slike služe za kontrolu praćenja spoja, kontrolu uvjeta zavarivanja, mjerenje oblika žlijeba i sl. Na temelju ovakvog načina praćenja procesa dobivaju se na uvid i eventualne pogreške poput [30,35]:

- Istrošenost kontaktne cjevčice
- Pogreške zbog nedovoljne kvalitete zaštitnog plina
- Prevelika penetracija i protaljivanje
- Preveliko nadvišenje zavara
- Prevelik unos topline

Oprema kod vizualne metode izrazito je skupa. Kao primjer, u usporedbi s klasičnom video kamerom koja snima 30-50 slika u sekundi, specijalno namijenjena kamera za snimanje

procesa zavarivanja snima brzinom od 1000-6000 slika u sekundi. Oprema za podešavanje parametara za osjetljivost svjetlosnog luka sastoji se od vrlo brze kamere, laserskog uređaja i filtrirajućeg uređaja. Svi ovi uređaji moraju biti vremenski usklađeni [35]. Slika 23. prikazuje metodu vizualnog praćenja procesa zavarivanja.



Slika 23. Primjena prostornog senzora – vizualna metoda [30]

Oprema i kod laserske i vizualne metode izuzetno je skupa, te se pokušava pronaći jeftiniji način za praćenje procesa zavarivanja u industrijskim uvjetima [35].

Tablicom 3. prikazana je usporedba optičkih senzora odnosno međusobne različitosti.

Tablica 3. Usporedba i ograničenja laserske i vizualne metode [30]

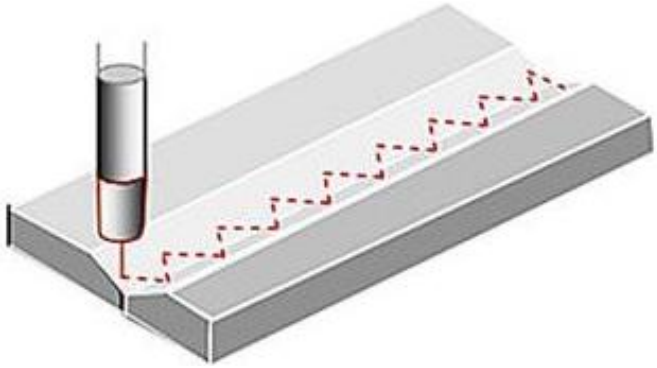
	Primjena: (+ moguće; * teško; - nemoguće)	Laserski senzor	Svjetlosni senzor
Oblik	Mjerenje geometrije žlijeba	+	*
	Mjerenje oblika kapljice prilikom prijenosa metala	+	*
	Oblik i položaj žice	-	+
	Oblik zavarenog spoja i električnog luka	-	+
	Daljinsko praćenje zavara	*	+
Položaj	Kontrola početne i krajnje točke zavarivanja	+	*
	Visina vrha pištolja	+	+
	Položaj žice	+	+
Zavar	Mjerenje širine žlijeba	+	+
	Mjerenje širine zavara	-	+
	Mjerenje geometrije zavara	-	+
	Mjerenje lica korijena zavara	-	+

4.3.2. Senzor električnog luka

Otkriće električnog luka kao senzora desilo se ne tako davne 1980. godine. Danas je primjena senzora električnog luka izvanredna. Osim što se najčešće primjenjuje kod robotiziranog zavarivanja, veliku primjenu ima i kod automatiziranih strojeva za zavarivanje. Rezultat ovako široke primjenjivosti je što nije potreban nikakav poseban uređaj koji bi se montirao na glavu pištolja i sl., već se sam električni luk koristi kao senzor. To ih čini vrlo jednostavnima i troškovno prihvatljivima u proizvodnji [23,30].

Senzorom električnog luka tako se može otkriti položaj i širina žlijeba te stanje rastaljenog metala mjerenjem različitih vrijednosti jakosti struje, napona električnog luka, frekvencije i dr. Najveća prednost je kontrola procesa u stvarnom vremenu odnosno konstantno tijekom cijelog vremena zavarivanja, izdržljivost, pristupačnost uskom prostoru itd. Specifična buka poput topline u električnom luku, svjetlost, magnetizam, raspršivanje kapljica u području električnog luka, deformacije u metalu i sl. nema nikakav utjecaj na proces što znači da ispunjava mnoge važne uvjete za praktičnu primjenu [30].

Najvažnije kod ovog senzora je provesti tehniku njihanja vrha žice (Slika 24.) i pritom iskoristiti izmjerene promjenjive vrijednosti napona koje nastaju posljedično zbog njihanja uslijed promjene geometrije žlijeba [25].



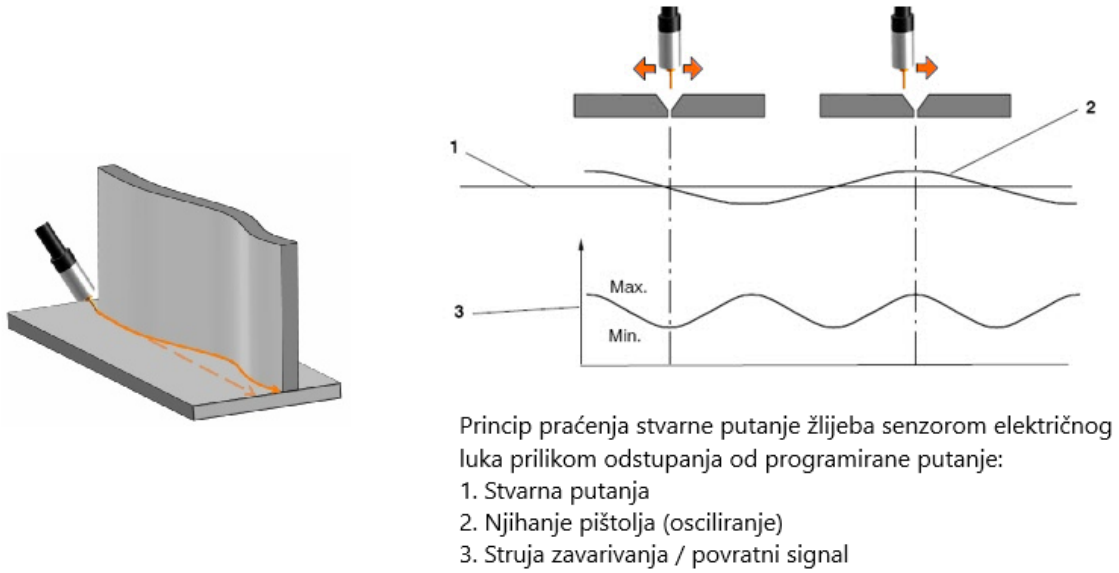
Slika 24. Primjer primjene tehnike njihanja [36]

Kada je riječ o robotiziranom zavarivanju, osnovni zahtjev koji mora biti ispunjen je mogućnost sustava za precizno praćenje linije zavara. To je vrlo važno jer kvaliteta zavarenog spoja ovisi o geometriji, obliku i pripremi spoja te o ponašanju taline tijekom procesa zavarivanja. Unaprijed programirane i definirane putanje gibanja ne daju traženu razinu preciznosti jer tijekom zavarivanja dolazi do deformacija i pomaka radnih komada bilo to zbog prevelikog unosa topline ili sličnih čimbenika [37].

4.3.2.1. Princip rada senzora električnog luka

Kod izuzetno teških i zahtjevnih zavarenih spojeva nije neobično da zbog unosa velike količine topline iz procesa zavarivanja ili zbog pomaka dolazi do izobličenja linije/krivulje zavarivanja. Kao rezultat toga, spoj može odstupati od programirane staze robota. U ovakvim primjenama dolazi do izražaja rad senzora električnog luka. Kod automatiziranih i robotiziranih sustava opremljenima senzorom električnog luka s posebno programiranim softverom, stvarni položaj putanje kutne ili sučeone V – pripreme spoja izračunava se obradom podataka izmjerenih tijekom njihanja električnih lukova, pri čemu se dobivaju odgovarajući pomaci s obzirom na izvorno programiranu putanju [34,38].

Na slici 25. prikazan je princip praćenja senzora električnog luka kod kutnog spoja i mjerenje podataka prilikom praćenja žlijeba kod sučeonog spoja [34].



Slika 25. Princip praćenja žlijeba senzorom električnog luka [34]

Senzor električnog luka koristi povratne informacije o parametrima električnog luka koji se konstantno dobivaju za vrijeme procesa zavarivanja, oscilirajućom kretnjom žice preko presjeka žlijeba po čitavoj njegovoj duljini. Zbog razlike duljine električnog luka između vrha pištolja i površine metala mijenja se karakteristika električnog luka struja – napon. Kod GMAW zavarivanja koristi se izvor napajanja s karakteristikom konstantnog napona (CV).

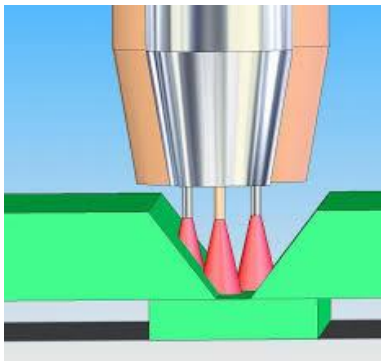
Približan odnos između parametara napona (U), jakosti struje (I) te udaljenosti vrha žice od površine metala (l) može se iskazati sljedećim izrazom:

$$U = \beta_1 \cdot I + \beta_2 + \frac{\beta_3}{I} + \beta_4 \cdot l \qquad (1)$$

gdje β_1, β_2, β_3 i β_4 predstavljaju konstante koji ovise o raznim faktorima poput dodatnog materijala (žice), zaštitnom plinu, karakteristici izvora struje i sl. Unatoč prethodno navedenoj

činjenici da se kod GMAW zavarivanja postupka zavarivanja koristi izvor napajanja s karakteristikom konstantnog napona, iz prethodno navedenog izraza (1) može se lako zaključiti da će se promjenom udaljenosti između vrha žice i površine metala (*l*) mijenjati i jakost struje (*I*). Porastom udaljenosti struja će padati, a smanjivanjem udaljenosti struja će rasti [23].

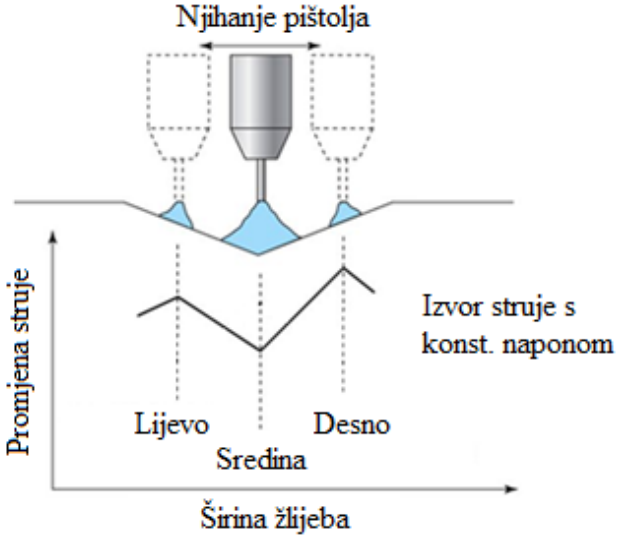
Na slici 26. prikazano je praćenje geometrije žlijeba tijekom procesa zavarivanja.



Slika 26. Praćenje geometrije žlijeba [39]

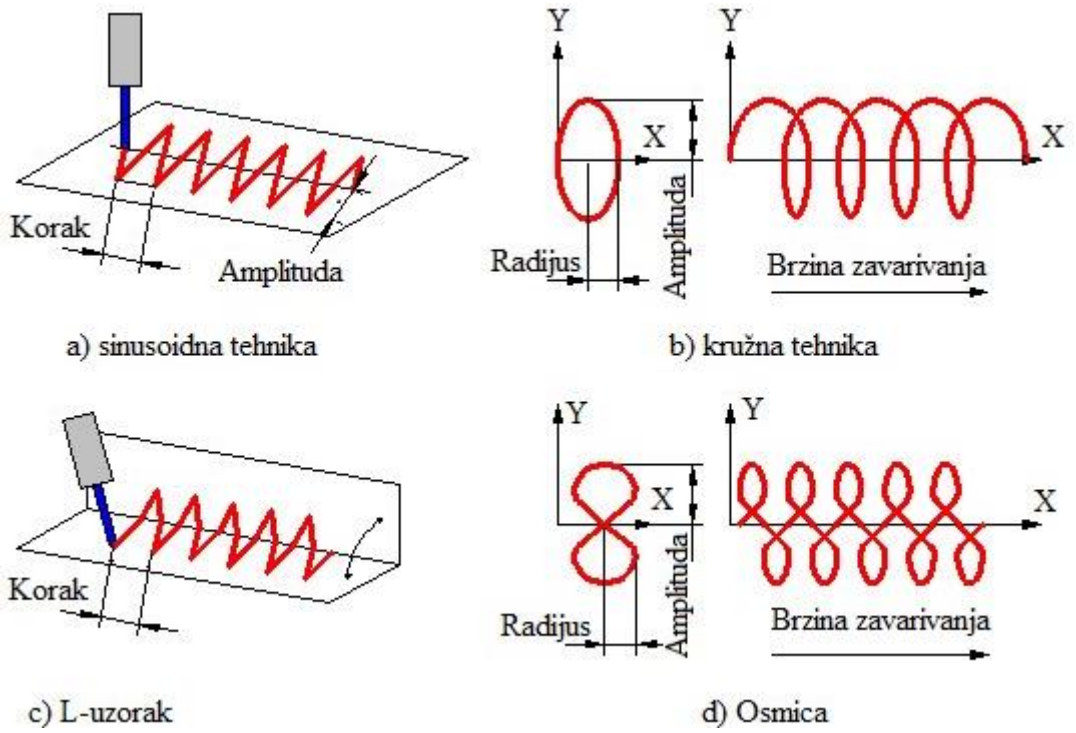
4.3.2.2. Primjena tehnike njihanja (utjecaj oblika i pripreme spoja i primjena)

Prethodno opisan princip vrlo je praktičan u praćenju geometrije i linije zavara. Ako ne postoji promjena geometrije žlijeba (promjene devijacije od nominalne putanje), tada je jakost struje jednaka nominalnoj (referentnoj) vrijednosti i ne dolazi do odstupanja u njezinoj vrijednosti. U slučaju da se pojavi promjena tj. da se smanji udaljenost između vrha žice na pištolju i površine osnovnog metala (Slika 27.), vrijednost jakosti struje je tada veća od referentne. Tada se i ostale vrijednosti na krivulji mijenjaju i ne odgovaraju vrijednostima referentnog slučaja. Na temelju novih podataka robot generira novu putanju i regulira vrijednost jakosti struje [25]. Na slici 27. prikazana je „V“ priprema spoja kod koje se provodi proces zavarivanja tehnikom njihanja pri čemu dolazi do promjene vrijednosti struje.



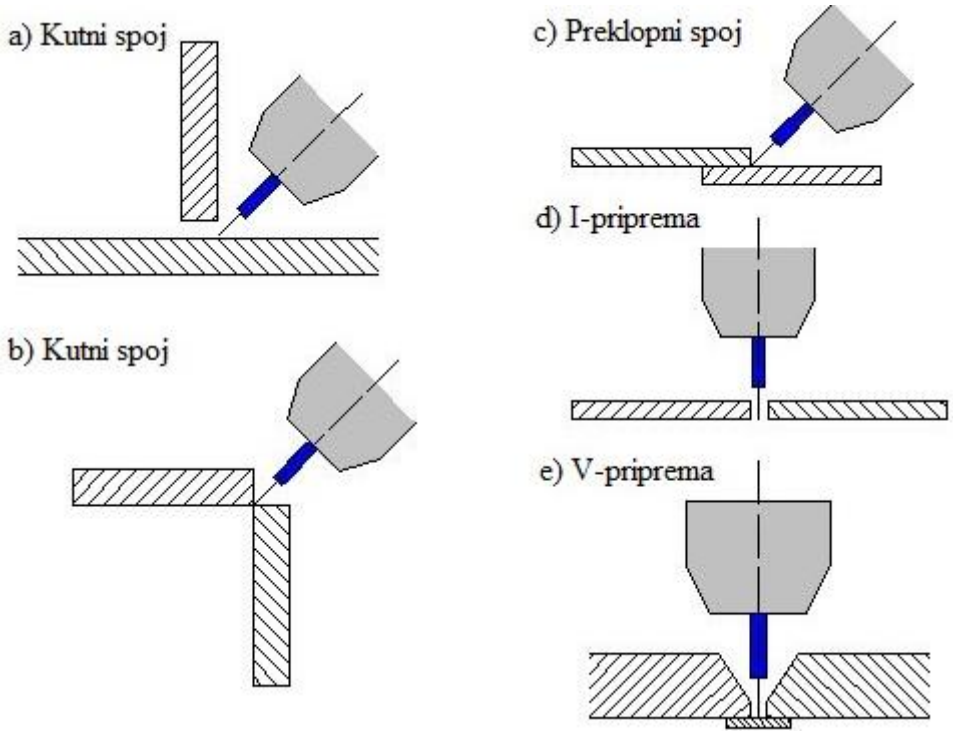
Slika 27. Promjena vrijednosti struje prilikom tehnike njihanja [28]

Slika 28. prikazuju različite krivulje zavarivanja (sinusoidna, kružna, L – uzorak, osmica).



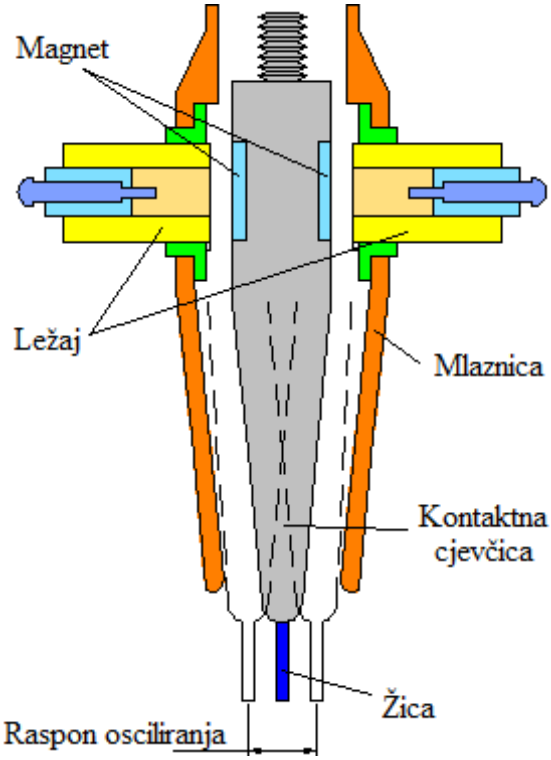
Slika 28. Tehnike njihanja a) sinusoidna b) kružna c) L-uzorak d) osmica [39]

Na slici 29. prikazano je zavarivanje različitih oblika spojeva te pripreme spojeva.



Slika 29. Oblici i pripreme spojeva za zavarivanje [23]

Kao što je prikazano na slici 30., za praćenje oblika žlijeba i primjenu tehnike njihanja, kod nekih MIG/MAG pištolja koristi se razvijena tehnika visokobrzinskog oscilirajućeg pištolja s elektromagnetskom vibracijom elektrode. Osim ove tehnike, razvijena je i tehnika s rotirajućim pištoljem koja koristi veće frekvencije, čime se poboljšava osjetljivost [30].



Slika 30. Pištolj s elektromagnetskom oscilacijom elektrode [30]

Eksperimenti koji su se provodili u svrhu ispitivanja osjetljivosti senzora električnog luka dokazali su da su dovoljne male amplitude njihanja (red veličine 1mm) za izvršenje kvalitetnog praćenja i mjerenje spoja jer mogućnost otkrića varijacije između vrha žice i površine metala iznosi ± 0,25 mm [23].

Primjer primjene je kod prijenosnog samoupravljačkog robota za zavarivanje s rotirajućim lukom velike brzine koji se može primijeniti za zavarivanje strukture rešetaka u blokovima trupa broda. Većinu kontrole pokreta robota obavlja senzor električnog luka npr. praćenje žlijeba i putanje zavara od kutnih spojeva pa sve do sučeonih spojeva, upravljanje samohodnim kolicima, otkrivanje položaja i sl. U načelu, druge metode poput laserske ili vizualne tehnike bi dati iste rezultate, ali ulaganje bilo bi znatno veće, složenost programiranja mnogo veća, a i same kamere bi predstavljale dodatnu opremu koja zauzima prostor i pritom smetale slobodnijem gibanju [30].

4.3.2.3. Utjecaj vrste prijenosa metala na osjetljivost senzora i primjena

Tehnika praćenja može se koristiti s potpunim rasponom prijenosa metala u električnom luku kao što su kratki luk, štrcajući luk i impulsno zavarivanje. Obradom podataka o varijaciji struje zavarivanja, robotski upravljački sustav može odrediti točan položaj zavarivanja zglobova u prostoru tijekom oscilirajućeg postupka zavarivanja (primijenjene tehnike njihanja). S obzirom na različite rezultate koji rezultiraju različitim vrstama električnog luka zbog različitih tehnoloških parametra, senzor električnog luka programira se pomoću sljedećih postavki [38]:

- osjetljivost senzora u širinu (1-5)
- osjetljivost senzora u visinu (1- 5)
- udaljenost odstupanja kod višeslojnog zavarivanja.

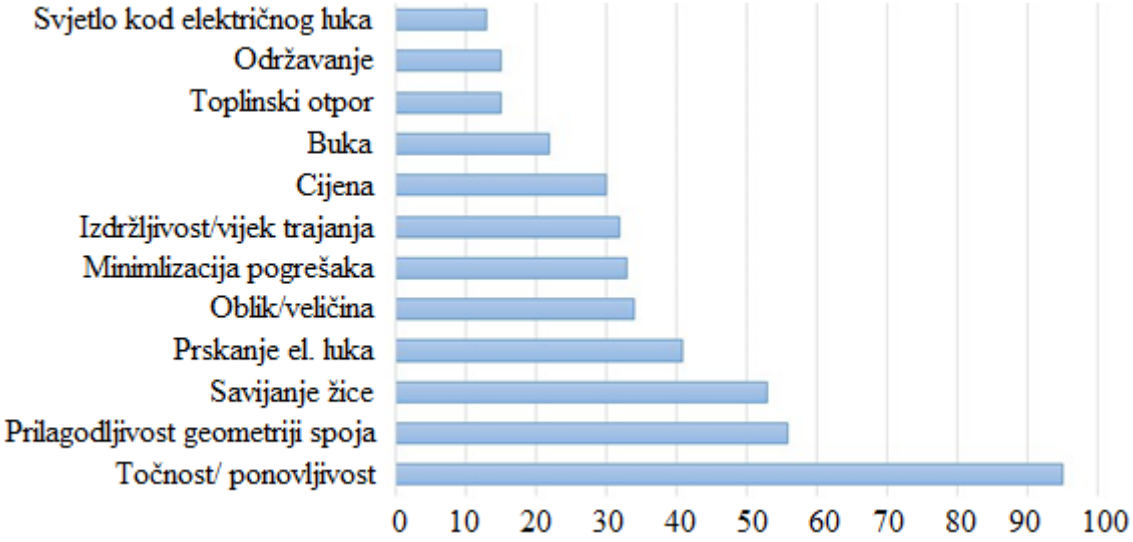
Različito podešeni parametri odnosno različite vrste prijenosa metala različito utječu na osjetljivost praćenja kod senzora električnog luka. Za kvalitetno praćenje spoja potrebno definirati optimalne parametre u smislu stabilnog električnog luka i jednolikog unosa topline [37].

Kod prijenosa metala impulsnim lukom, parametri zavarivanja optimalno su podešeni i odvajanje kapljica je kontrolirano zbog čega je i električni luk stabilniji. Ovakav prijenos metala moguće je primijeniti u gotovo svim područjima primjene od jednostavnih sučeonih, pa do složenih kutnih spojeva ili pomaknutih i deformiranih predmeta. Za razliku od impulsnog zavarivanja, kod prijenosa metala štrcajućim lukom električni luk manje je stabilan, a razlog tome su visoki parametri. Nestabilniji električni luk otežava funkcioniranje senzora zbog izraženije „buke“ signala. Prijenos metala štrcajućim lukom preporuča se samo za zavarivanje sučeonih spojeva. U slučajevima poput kutnih spojeva, zavarivanje štrcajućim lukom nije prigodno jer velika količina taline ometa signale struje koje koristi senzor električnog luka za uspješno praćenje. Zavarivanje kratkim spojevima ne rezultira uspješnim praćenjem jer signali koje primi senzor kod navedenog prijenosa variraju, a to je posljedica izričito brze periodičke izmjene faze kratkog spoja i faze električnog luka. Kontinuirane promjene duljine električnog luka predstavljaju signalnu buku i imaju negativan utjecaj na rad senzora. Osim definiranja osnovnih parametara zavarivanja (jakost struje i napon), potrebno je definirati i parametre njihanja (frekvencija njihanja, zadržavanje na rubovima, amplituda njihanja...) koje je nužno (u svrhu dobivanja simetričnog signala jakosti struje) prilikom korištenja elektrolučnog senzora [37]. Parametri zavarivanja i njihanja podešavaju se kako bi se postigao zavareni spoj tražene kvalitete, a taj odabir parametara može znatno utjecati na rad senzora i kvalitetu praćenja [37].

4.3.2.4. Prednosti i ograničenja senzora električnog luka

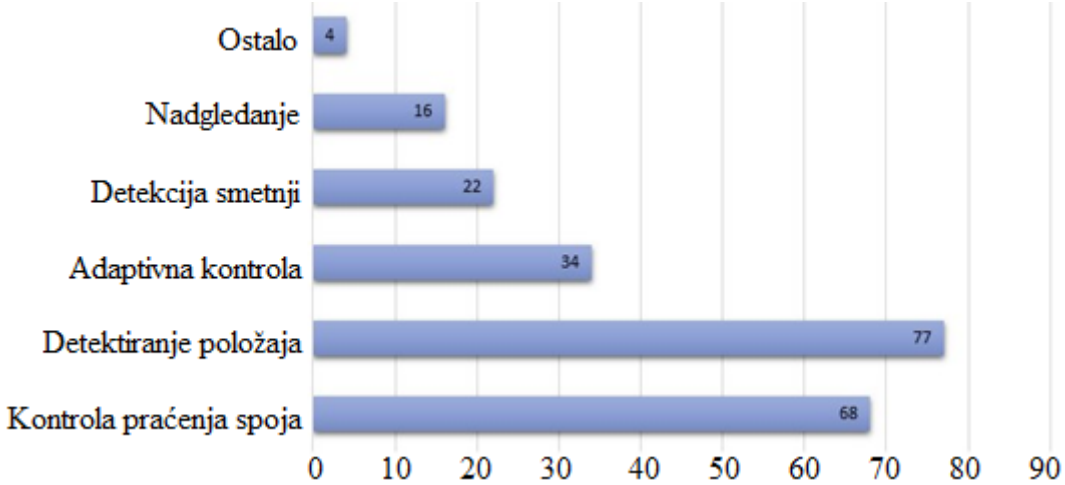
Primjena tehnologije senzora električnog luka vrlo je široka iz razloga što nema potrebe za dodatnim senzorima kojima bi se opremao robot, što čini ovu tehnologiju vrlo jednostavnom za praktičnu primjenu u industriji i ekonomski prihvatljivom zbog niske cijene. Nadalje, ovakva tehnologija lako se može uvest u sustave zatvorene petlje i u usporedbi s vizualnim sustavima, značajno je brža. Također, riječ je o beskontaktnoj tehnologiji gdje ne dolazi do poremećaja uzrokovanih specifičnom bukom okoline [25].

Na slici 31. prikazuju se problemi koji se postavljaju vezano uz senzor električnog luka koje je potrebno riješiti.



Slika 31. Problemi koje je potrebno riješiti kod senzora električnog luka [30]

U budućnosti senzori električnog luka imat će značajnu ulogu u procesu robotiziranog i automatiziranog zavarivanja. Slika 32. prikazuje svrhu primjene senzora električnog luka u budućnosti.



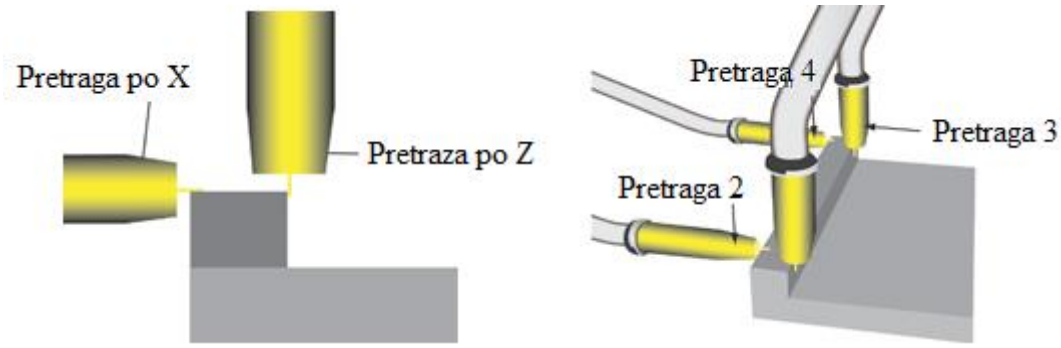
Slika 32. Svrha senzora električnog luka u budućnosti [30]

4.3.3. Ostali senzori

Osim optičkih senzora i senzora električnog luka, kod procesa robotiziranog i automatiziranog zavarivanja koriste se i druge vrste senzora koji se kvalificiraju u kontaktne i beskontakne [30].

a) Taktilni senzor žicom

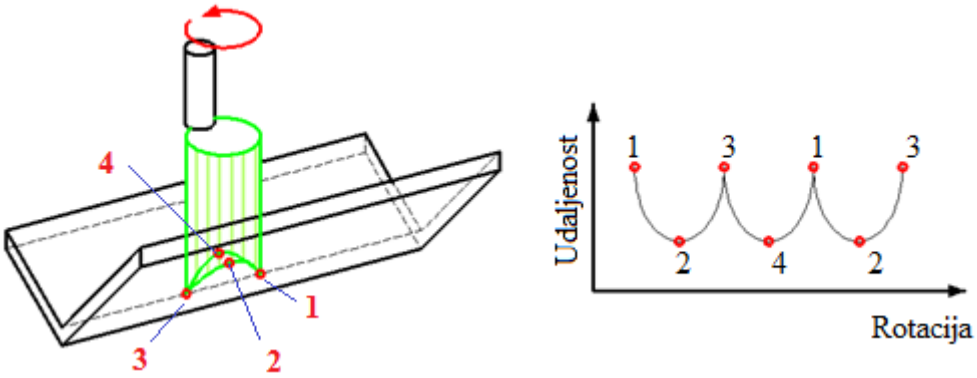
Taktilni senzor spada u sustav niskih troškova koji se temelji na programu. Sustav radi na principu dodira vrha žice, mlaznice ili nekog drugog elementa senzora s predmetom koji se zavaruje (Slika 33.). Robot zatim pohranjuje podatke o položaju i automatski podešava cijelu putanju prije početka zavarivanja. Moguće su prilagodbe u jednoj, dvije ili tri dimenzije. Glavni nedostatak pri korištenju dodirnih senzora je dulji vremenski ciklus zbog obavljanja rutinskih pretraga položaja. Dodatno vrijeme obično varira 3-5 sekundi po položaju [40].



Slika 33. Princip pretrage položaja dodirnim senzorom [40]

b) Elektro – kapacitivni senzor

Senzor mjeri udaljenost koristeći elektrostatski kapacitet između radnog komada i elektrode senzora. Pomoću ekscentričnog gibanja elektrode senzora (Slika 34. lijevo), senzor detektira udaljenost radnog komada (Slika 34. desno). Prethodna priprema površine nije potrebna, tj. različite tvari poput ulja, hrđe, filma i sl. ne utječu na metodu. Točnost mjerenja udaljenosti kreće se u rasponu ± 0,2 mm. Ovom metodom moguće je smanjiti vrijeme učenja za ¼ nominalnog vremena [30].

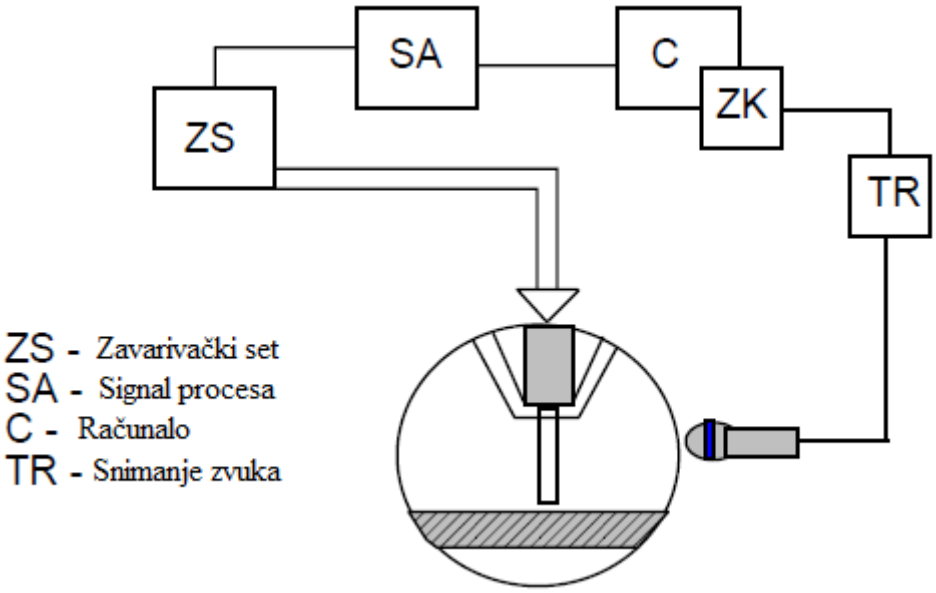


Slika 34. Princip rada elektro-kapacitivnog senzora [30]

c) Akustični senzor

Akustični senzor u budućnosti zasigurno će imati važnu ulogu za praćenje procesa zavarivanja. Akustično promatranje blizu električnog luka je jeftino i praktično. Kao akustični senzor, koristi se mikrofon. No ova metoda ima i nekoliko nedostataka. Tijekom procesa zavarivanja javljaju se mnogi sporedni zvukovi i šumovi koji ne dolaze od procesa zavarivanja, a akustični senzor ih zabilježi, tako da pri kasnijoj analizi dolazi do problema jer je teško raščlaniti koje su frekvencije procesa zavarivanja, a koje su frekvencije sporednih zvukova. Drugi problem je kašnjenje zvuka jer je potrebno određeno vrijeme za putovanje zvuka od električnog luka do mikrofona. Trenutno, ovaj senzor ima primjenu samo u laboratorijskim uvjetima dok je za industrijsku primjenu još prerano govoriti. Poznato je da ako dolazi do promjene zvuka tijekom procesa zavarivanja, da se nešto događa u električnom luku tj. dolazi do nekakve pogreške. Postavlja se pitanje „do kakve pogreške dolazi?“. Odgovor na ovo pitanje zasigurno će dati ovaj senzor, samo je još uvijek veliki problem zapis i analiza zvukova zavarivanja [34].

Slika 35. prikazuje princip korištenja akustičnog senzora.



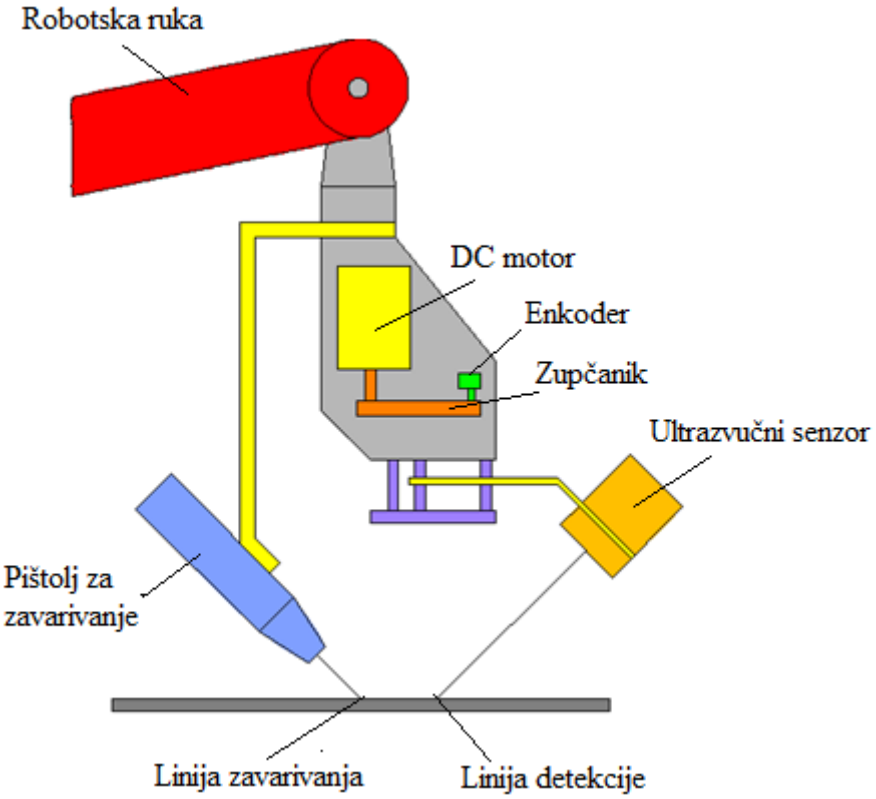
Slika 35. Prikaz akustičnog senzora [34]

d) Ultrazvučni senzor

Razvijen je sustav kojim je moguće tijekom zavarivanja ultrazvukom pratiti i otkrivati nastale pogreške zavarenog spoja. Moguće je korigirati parametre i uvjete zavarivanja odmah nakon pojave pogreške i korekcijom uzroka odmah djelovati na proces zavarivanja da se pogreška više ne pojavljuje. Ovakvim načinom štedi se vrijeme koje je potrebno za popravljanje pogrešaka. Nedostatak ovakvoga postupka otkrivanja pogrešaka su visoke temperature metala

za ultrazvučnu sondu u blizini linije zavarivanja. Visoke temperature smanjuju točnost u pronalaženju položaja i karakteriziranju pogreške [34].

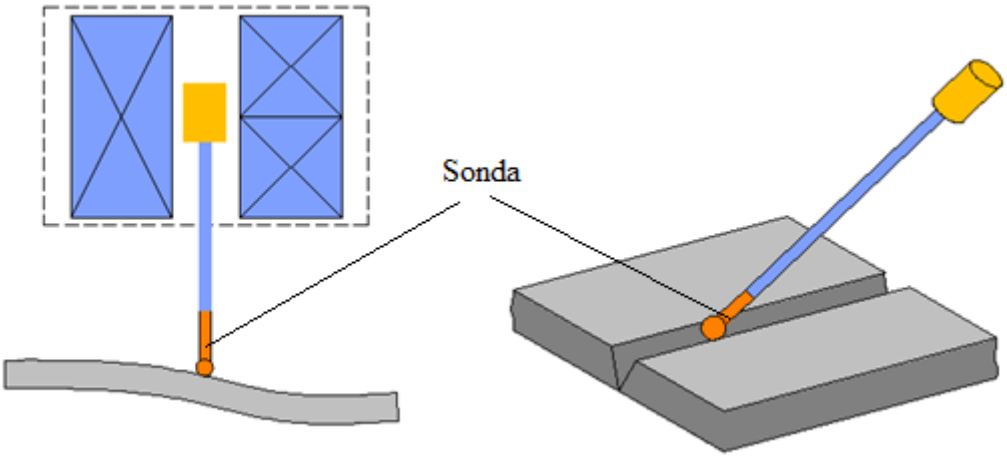
Na slici 36. nalazi se primjer ultrazvučnog senzora.



Slika 36. Ultrazvučni senzor [30]

e) <u>Taktilni senzor</u>

Riječ je o senzoru za mjerenje udaljenosti s pomoću detektora u obliku štapića sa sondom na vrhu. Sondom se prolazi po površini metala i registrira udaljenost. Za primjenu ovog postupka potrebno je pripazit na pogreške koje može uzrokovati otpor trenja između površine metala i sonde [30]. Slika 37. prikazuje taktilni senzor.



Slika 37. Taktilni senzor [30]

4.4. Upotreba senzora pri robotiziranom MAG zavarivanju u realnoj proizvodnji

Idealni senzor kod robotiziranog zavarivanja trebao bi mjeriti i kontrolirati položaj i parametre zavarivanja, pratiti putanju zavarenog spoja, prepoznati promjenu geometrije u stvarnom vremenu i pravilno reagirati, pronaći početnu poziciju zavara, prepoznati promjene u okolišu i izbjeći sudar. Također, senzor bi trebao biti što manji, kompaktniji i bez ograničenja dostupnosti kako bi mogao uklopiti u svaki prostor. Idealni senzor koji kombinira sve zahtjeve ne postoji. Stoga, u realnoj proizvodnji, u industriji, potrebno je odabrati senzor koji je pogodan za zavarivanje u specifičnoj situaciji. Sve većim razvojem, pravilnim odabirom i implementacijom senzora u robotizirane sustave opravdan je nedostatak i ograničenje senzora [15].

Već je u prethodnim poglavljima spomenuto da robotizirane zavarivačke stanice imaju velike prednosti naspram ručnog zavarivanja te da se ekonomičnost i fleksibilnost njihovom upotrebom sve više povećava. Gledano kroz povijest, robotizirano zavarivanje u početku nije bilo isplativo za industrijsku upotrebu zbog visokih početnih investicijskih troškova ulaganja, produljenog vremena obrade, fizičkih veličina i masivnosti senzora, nemogućnosti postizanja željene točnosti procesa i dr. Osim toga ljudski utjecaj je bio vrlo velik. Kod složenijih radnih komada, posao programiranja bio je mukotrpan i iscrpljujući, a vrlo često su se događale i pogreške. Razvojem senzora i njihovom sve većom implementacijom u robotizirane zavarivačke stanice, utjecaj čovjeka se smanjuje i postaje sve manji, a rezultati zavarivanja postaju nevjerojatni, dok tehnologija robotiziranog zavarivanja svojim performansama postaje sve konkurentnija na tržištu i u industriji. Upotrebom senzora povećava se sposobnost jednostavnijeg programiranja, praćenja putanje žlijeba koja može varirati uslijed metodologije proizvodnje ili toplinskih utjecaja procesa, mjerenja širine ili profila žlijeba na temelju čega se može donijeti odluka o brzini i putanji gibanja robota te se sam proces može prilagoditi različitim lokalnim uvjetima. Upotrebom senzora, robotizirane stanice mogu da se upuste u neke od najtežih izazova za zavarivanje [41].

Na sljedećim primjerima iz realne proizvodnje objašnjena je opravdanost upotrebe senzora kod robotiziranog zavarivanja.

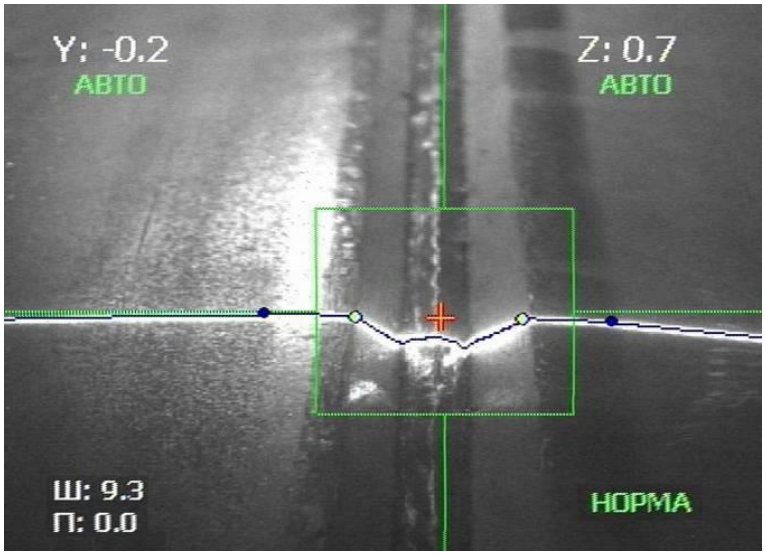
4.4.1. *Zavarivanje kolica / podvozja za putničke vagone*

Vrlo važan primjer primjene senzora kod robotiziranog zavarivanja javlja se u željezničkoj industriji za proizvodnju kolica/podvozja za putničke vagone. Proizvodnja ovakvih proizvoda koristi velike debljine ploča, otkivaka i odljevaka, a zahtjevi koje postavljaju proizvodi su jamstvo trajanja od 30 godina i više. Ploče, otkivci i odljevci, kada su sklopljeni, zahtijevaju uske tolerancije čime se postrožava kriterij zavarivanja. Potrebno je uvođenje visokokvalitetnog sustava za praćenje spoja, poput laserskog skeniranja ili vizualne kamere, čime se omogućuje izvedba spoja s izvrsnim rezultatima. Ovakav sustav senzora za praćenje i kontrolu vrlo je skup, no s obzirom na okruženje gdje je prag troškova visok, i dalje je prihvatljiv. S obzirom da postoje različite kategorije laserskog skeniranja poput 1D, 2D, 3D, točkasto, linijsko i prostorno skeniranje, potrebno je provesti pravilno planiranja i pripreme u odabiru senzorskog sustava, čime se smanjuje rizik da proces ili sustav postane ugrožen, ili nesposoban za obavljanje predviđenih i željenih zadataka za koje je kupljen. Prilikom odabira odgovarajuće kombinacije kamere ili lasera, treba razmotriti veličinu najmanjeg objekta ili značajke koja se prati ili je otkrivena, točnost mjerenja koja mora ispunjavati kriterije procesa, brzinu prikupljanja i vrijeme potrebno za ispunjavanje zahtjeva izlazne petlje kao i aspekte okoliša poput temperature, vibracija, osvjetljenja, vlage koji imaju mogućnost utjecati na pouzdanost i kvalitetu rezultata [41].

Na slici 38. prikazana je proizvodnja kolica/podvozja za putničke vagone upotrebom laserskog senzora za skeniranje.

Slika 38. Kolica putničkog vagona proizvedena upotrebom laserskog senzora [41]

Slika 39. prikazuje primjer primjene kamere za mjerenje geometrije.



Slika 39. Određivanje geometrije primjenom video kamere [42]

4.4.2. Zavarivanje vretena vijčane pumpe

Savršen primjer za praćenja putanje kod robotiziranog zavarivanja vretena vijčane pumpe ostvaruje se pomoću senzora električnog luka. Na senzor se postavlja nekoliko izazova koje mora zadovoljiti kako bi se postigli željeni rezultati. Prvi izazov je taj što je vreteno izrađeno od složenih krivulja raspoređenih u dvije ravnine koje robot mora ispratiti. Drugo, tolerancije su vrlo uske što postavlja više zahtjeve za točnost i preciznost na senzore [41].

Slika 40. prikazuje proizvodnju jednovojnog vretena vijčane pumpe korištenjem senzora električnog luka i taktilnog senzora.

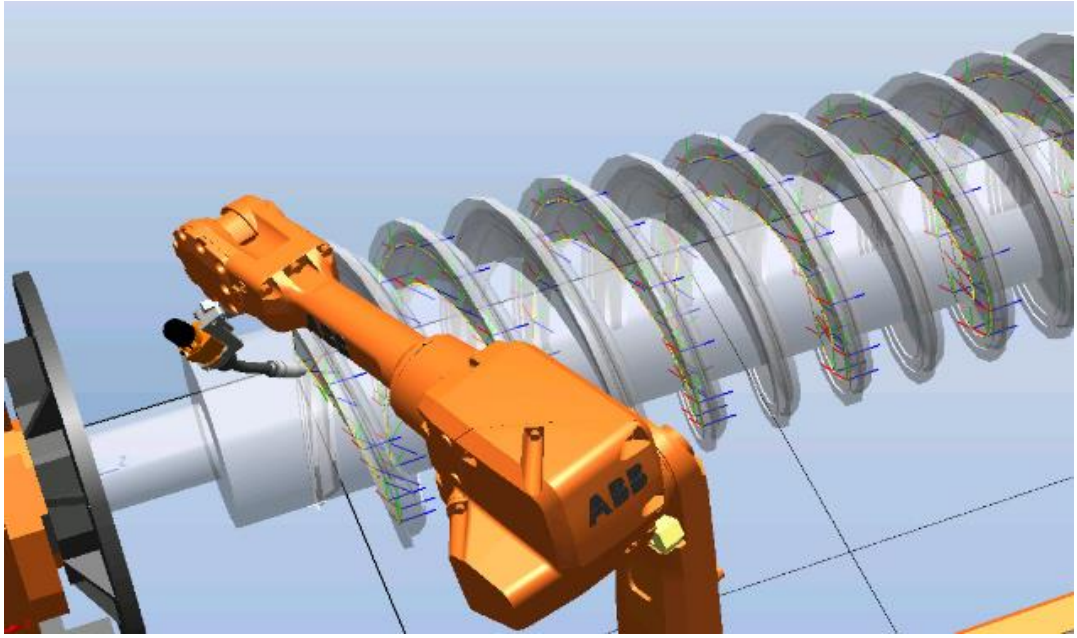
Slika 40. Vreteno vijčane pumpe [43]

Kod ovog primjera koristi se senzor električnog luka te tehnika njihanja sa središnjim praćenjem žlijeba. Provedba praćenja žlijeba zahtjeva programiranje samo nekoliko strateških

točaka na početku i na kraju zavarivanja. Te točke definiraju se upotrebom taktilnih senzora, a jednom kad se uspostavi električni luk, robot u kombinaciji sa pozicionerom izvršava sinkronizirano kretanje rotirajući vreteno. Senzor električnog luka prati žlijeb i ostvaruje savršeno precizne zavarene spojeve. Bez korištenja praćenja žlijeba, robotizirano zavarivanje zahtijevalo bi programiranje mnogo točaka kako bi se generirala što pravilnija putanja koju bi robot mogao pratiti [41].

Ukoliko bi vreteno bilo dvovojno ili više vojno, za svaku krivulju bilo bi potrebno programirati ponovo mnogo točaka koje bi formirale putanju gibanja robota što bi u konačnici bio dugotrajan proces podlegnut mnogim pogreškama, većim zahtjevima na procesor računala, a i sam posao programiranja bio bi iscrpljujući [41].

Slika 41. prikazuje proizvodnju vretena vijčane pumpe bez upotrebe senzora gdje je potrebno programirat 6000 točaka kako bi se izvršila kvalitetna izvedba zavarenog spoja [41].



Slika 41. *Off - line* programiranje bez upotrebe senzora [41]

Gledano općenito, danas je robotizirano zavarivanje bez upotrebe senzora nezamislivo. Roboti i senzori zajedno sa svojim pripadajućim kontrolnim sustavima postali su važni elementi industrijske proizvodnje. Oni nude mnoge prednosti poput poboljšanja kvalitete zavarivanja, povećanja produktivnosti, smanjenje troškova zavarivanja, povećanje konzistencije ponovljivosti zavarivanja, minimalizacija unosa operatera za odabir parametara zavarivanja, put robotskog gibanja i otkrivanje i ispravljanje pogrešaka [15].

5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalno ispitivanje provedeno je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u Laboratoriju za zavarivanje. Bogato opremljen laboratorij između ostalog posjeduje robotsku stanicu VRC – 1G MIG + 1G TIG/1dm s robotskim manipulatorom OTC Almega AX – V6 na kojemu je provedeno istraživanje.

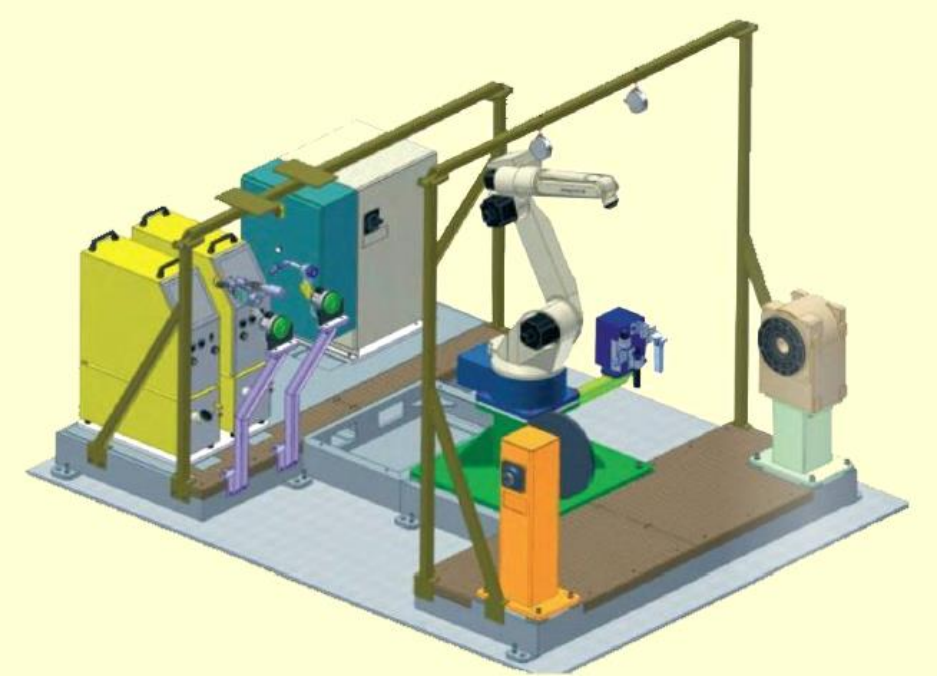
Istraživanjem je bilo potrebno definirati, za određeni oblik i geometriju spoja, sve potrebne parametre senzora električnog luka koji omogućuju praćenje putanje spoja. Za praćenje spoja zaslužan je senzor električnog luka model AX – AR.

Na slici 42. prikazana je robotska stanica kojom je opremljen Laboratorij za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Slika 42. Robotska stanica u Laboratoriju za zavarivanje

5.1. Opis radnog prostora – robotska stanica VRC – 1G MIG + 1G TIG/1dm

Na slici 43. prikazan je grafički prikaz robotskog sustava VRC – 1G MIG + 1G TIG/1dm i njegovih osnovnih komponenti od kojih se sastoji. Položaj komponenti raspoređen je na način da robot može doseći maksimalni doseg unutar svojih specifikacija, a da se pritom ne dođe do sudara s drugim komponentama s kojima čini cjelinu. Preporučena konfiguracija je optimalna jer osigurava programiranje što jednostavnijim i zavarivanje u što kraćem vremenu.



Slika 43. Grafički prikaz robotske stanice VRC – 1G MIG + 1G TIG/1dm [44]

Glavne komponente od kojih se sastoji robotska stanica VRC – 1G MIG + 1G TIG/1dm su sljedeće:

1. Robot za zavarivanje OTC Almega AX – V6
2. Robotski kontroler Almega AX – C s dodatnom vanjskom osi i funkcijom Multi - Synhromotion
3. Izvor struje MIG/MAG DP 400
4. Izvor struje TIG DP 300
5. Automatski uređaj za čišćenje sapnice, sustav za nanošenje sredstva protiv naljepljivanja žice i sustav za rezanje žice
6. Sustav za automatsko dovođenje žice
7. Okretljivi pozicioner P 250 V ROBO
8. Senzor: ARC senzor AX - AR (senzor električnog luka)
9. Napajanje upravljačkog dijela

5.1.1. Robot za zavarivanje OTC Almega AX – V6

AX – V6 je brzi i glatki manipulator kretanja koji skraćuje vrijeme proizvodnje zahvaljujući modernom servo upravljačkom sustavu s naprednim postavkama ubrzanja. Prvenstveno je namijenjen za MIG/MAG i TIG zavarivanje, ali postoje i mogućnosti za tandem MAG zavarivanje, aluminijsko MIG zavarivanje i plazma rezanje lukom. AX – V6 idealan je za aplikacije velikih brzina zavarivanja, a posjeduje i kontrolu ograničenja vibracija čime eliminira vibracije čak i pri zaustavljanju kod maksimalne brzine [45].

Sa šest rotacijskih stupnjeva slobode gibanja, robotu je omogućena potpuna orijentacija i pozicioniranje pištolja unutar radnog prostora.

Na slici 44. prikazan je primjer robota AX – V6 u položaju za zavarivanje

Slika 44. Robot AX - V6 u položaju za zavarivanje

Robot AX – V6 čine sljedeći dijelovi:

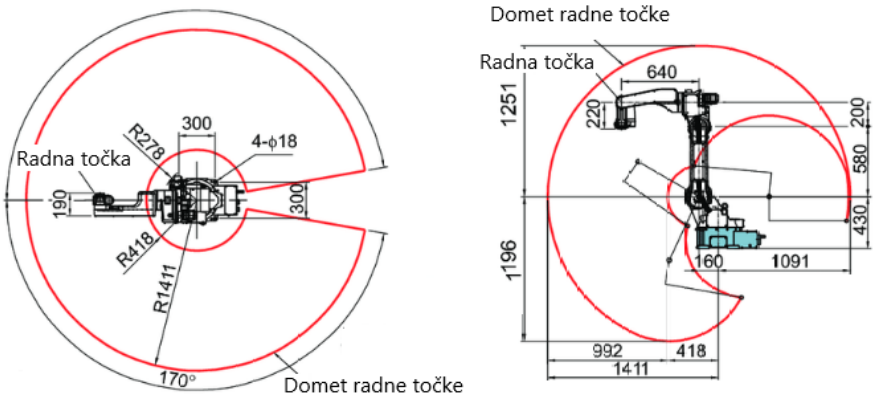
1. Postolje
2. Rotacijska glava
3. Donja ruka
4 Gornja ruka
5. Ruka za prihvat pištolja za zavarivanje
6. Upravljačka jedinica
7. Privjesak za učenje

Tablica 4. prikazuje tehničke specifikacije robota OTC Almega AX – V6.

Tablica 4. Specifikacije robota OTC Almega AX - V6 [46]

Naziv robota		**OTC Almega AX – V6**
Struktura		vertikalni, revolutni robot
Broj slobodnih osi		6 osi rotacije
Maksimalno opterećenje		6 kg
Točnost		± 0,08 mm
Pogonski sustav		AC – servo motor
Snaga pogona		2 750 W
Očitanje kutnog zakreta		apsolutni enkoder
Opseg gibanja	Os 1 (okretanje)	340° (±170°)
	Os 2 (donja ruka robota)	245°(-90° , +155°)
	Os 3 (gornja ruka robota)	360°(-170° , +190°)
	Os 4 (valjanje prihvatnice)	360° (±180°)
	Os 5 (posrtanje ruke robota)	280°(-50° ~,+230°)
	Os 6 (skretanje ruke robota)	720° (±360°)
Dopuštena brzina oko pojedinih osi	Os 1 (okretanje)	150°/s
	Os 2 (donja ruka robota)	160°/s
	Os 3 (gornja ruka robota)	170°/s
	Os 4 (valjanje prihvatnice)	340°/s
	Os 5 (posrtanje ruke robota)	340°/s
	Os 6 (skretanje ruke robota)	520°/s
Temperaturno područje rada		0 – 45°C
Vlažnost zraka		20 – 80 %
Masa robota		155 kg

Na slici 45. prikazan je radni prostor robota OTC Almega AX – V6.

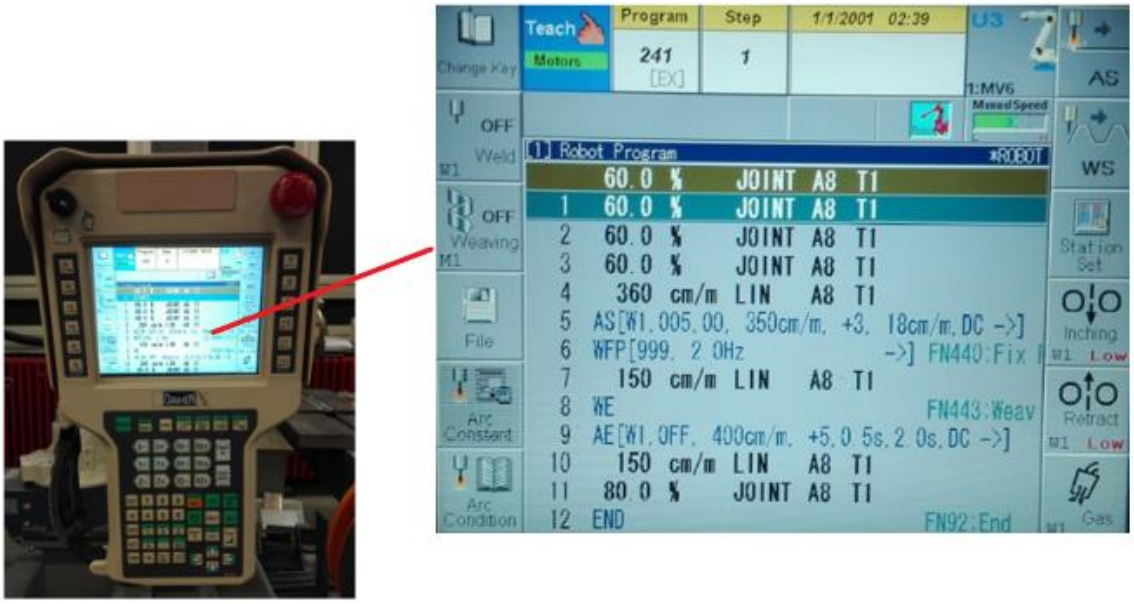


Slika 45. Radni prostor robota Almega AX – V6 [46]

5.1.2. Privjesak za učenje, AX – C kontroler i okretljivi pozicioner P 250 V ROBO

Pored navedenih dijelova robota, vrlo važna komponenta koja čini robotsku stanicu je privjesak za učenje. Privjeskom za učenje provodi se *on – line* programiranje temeljeno na učenju putanje i podešavanju tehnoloških parametara zavarivanja. Operacijski sustav baziran je na Windows NT sučelju što čini programiranje vrlo jednostavnim, a ukoliko se pojave nejasnoće, postoji opcija *help tutorial* koja objašnjava svaku stavku, korak i operaciju programa. Također, ovakva vrsta operacijskog sustava olakšava pohranjivanje podataka te mrežno povezivanje.

Slika 46. prikazuje privjesak za učenje s optimalno programiranim prikazom na zaslonu.



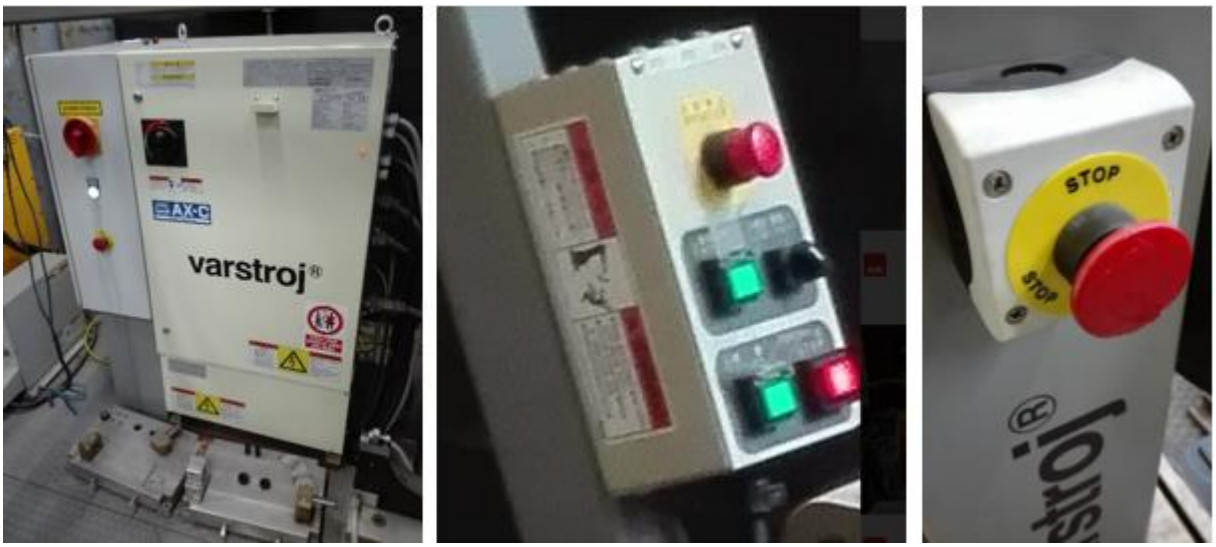
Slika 46. Optimalan prikaz programa na zaslonu privjeska za učenje

Program i podaci se pohranjuje u memoriju, a postoji mogućnost razmjene programa, stvaranje *backup*-a ili spremanje programa pomoću USB memorije.

Slika 47. prikazuje pohranu podataka na USB memoriju.

Slika 47. Pohrana podataka na USB memoriju [44]

Robotski kontroler AX – C koji je prikazan na slici 48. (lijevo) služi za obavljanje osnovnih operacija poput uključivanja i isključivanja motora, odabira između automatskog režima rada i režima rada za učenje (Slika 48. sredina), zaustavljanja motora u hitnim situacijama (Slika 48. desno) i sl.



Slika 48. AX - C kontroler

Funkcija Multi – Synhromotion posebna je značajka robotskog kontrolera AX – C, a omogućuje održavanje konstantne brzine zavarivanja i položaj nagiba pištolja. Puni potencijal ove funkcije izražen je kod zavarivanja kompleksnih radnih komada koji se zavaruju. Također, funkcija ima zadaću objediniti složeno gibanje između robota i okretljivog pozicionera P 250 V ROBO.

Na slici 49. prikazan je okretljivi pozicioner P 250 V ROBO.

Slika 49. Okretljivi pozicioner P 250 V ROBO

5.1.3. Izvor struje OTC Daihen Varstroj DP400

Robotsku stanica opremljena je s dva izvora struje. Jedan izvor struje namijenjen je za MIG/MAG postupke zavarivanja, a drugi za TIG postupak zavarivanja. U eksperimentalnom istraživanju korišten je MAG postupak zavarivanja pa tako i izvor struje OTC Daihen Varstroj DP 400. Maksimalna struja koju može dati ovaj izvor struje iznosi 400 A pri nazivnom naponu od 34 V s intermitencijom od 50%. Intermitencija od 100% postiže se kod jakosti struje od 283 A i napona od 28.2 V.

Slika 50. prikazuje izvor struje DP 400 i pločicu s njegovim specifikacijama.

Slika 50. Izvor struje OTC Daihen 400 i njegove specifikacije

Slika 51. prikazuje kontrolnu tablu izvora struje Daihen DP 400 te značenje osnovnih simbola koji služe za podešavanje i praćenje procesa kod robotiziranog MAG zavarivanja.

1. Vrijednost jakosti struje (A) i brzine žice za zavarivanje (m/min)
2. Vrijednost napona (V) i korekcije (±)
3. Podešavanje odabranog parametra
4. Podešavanje karakteristike električnog luka
5. Definiranje vrste procesa
6. Definiranje dodatnog materijala i zaštitnog plina
7. Definiranje promjera žice (mm)
8. Izvlačenje žice
9. Kontrola zaštitnog plina

Slika 51. Značenje pojedinih simbola na kontrolnoj tabli izvora struje

5.1.4. *Senzor električnog luka (ARC senzor model AX – AR)*

Najvažnija komponenta robotske stanice na kojoj se temelji eksperimentalno istraživanje je senzor električnog luka. Riječ je o senzoru električnog luka AX – AR koji služi za praćenje putanje zavarenog spoja na temelju izmjerenih parametara električnog luka prilikom pomaka od nominalne/programirane putanje. Za uspješno praćenje zavarenog spoja potrebno je pravilno podesiti utjecajne parametre na senzora električnog luka kao što su:

1. Struja zavarivanja (engl. *Welding current*)

2. Slobodni kraj žice (engl. *Arc length tun*)

3. Brzine zavarivanja (engl. *Welding speed*)

4. Karakteristika električnog luka (engl. *Arc characteristic*)

5. Brzina korekcije – horizontalna i vertikalna (engl. *Chasing sensitivity*)

6. Razmak, odstupanje (engl. *Offset*)

7. Raspon odstupanja devijacije (engl. *Track deviation Range*)

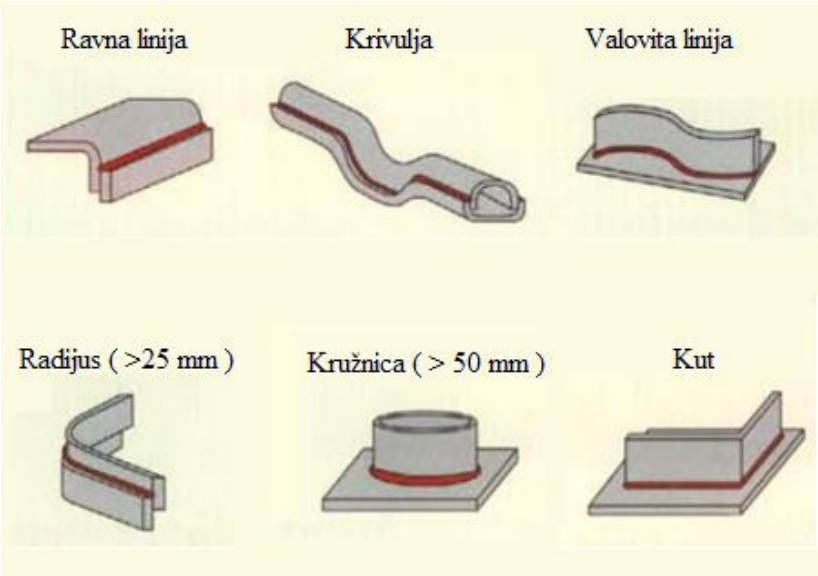
Osim spomenutih parametara velik utjecaj na praćenje spoja imaju vrsta prijenosa metala u električnom luku (kratki spojevi, mješoviti luk, impulsni luk), vrsta i protok zaštitnog plina, dimenzije i geometrija radnog komada itd. Navedeni parametri, ukoliko su nepravilno podešeni dovode do nestabilnog prijenosa metala u električnom luku i mogu utjecat na osjetljivost senzora električnog luka te prekinut praćenje spoja.

Slika 52. prikazuje senzor električnog luka AX – AR.

Slika 52. Senzor električnog luka AX - AR

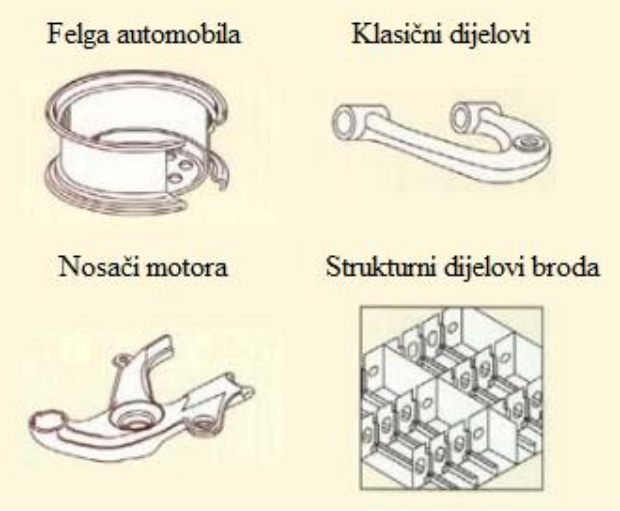
Prema riječima proizvođača, senzor AX – AR smanjuje greške prilikom zavarivanja, najisplativiji je među senzorima na robotizirano zavarivanje i ne zahtjeva nikakve dodatne uređaje koji bi se montirali na vrh pištolja što omogućuje pristup uskom prostoru. Primjena funkcije praćenja moguće je postići kod ravne putanje, zakrivljene putanje, valovite putanje (kut manji od 10°), radijusa većeg od 25 mm, kružnice veće od 50 mm ili kutne putanje spoja.. Uglavnom, namijenjen je za praćenje linija u horizontalnoj ravnini pri čemu se točnost praćenja kreće u rasponu od ± 0,1 mm [47].

Slika 53. pokazuje primjenu funkcije praćenja zavarenog spoja koju omogućava senzor električnog luka AX – AR.



Slika 53. Funkcija praćenja za različite vrste putanja zavarenog spoja [47]

Slika 54. prikazuje primjere primjene senzora električnog luka kod postupka robotiziranog zavarivanja .



Slika 54. Primjeri primjene senzora električnog luka [47]

5.2. Priprema uzorka

Prije početka istraživanja i definiranja svih potrebnih parametara senzora električnog luka koji omogućavaju praćenje putanje spoja potrebno je pripremiti uzorke. Materijal uzoraka su čelične ploče oznake S 235 JR. Prema europskoj normi EN 10025-2: (2004, europska norma za toplo valjani strukturni čelik, dio 2 - Tehnički uvjeti isporuke za nelegirane konstrukcijske čelike), riječ je općem konstrukcijskom čeliku (oznaka S) s minimalnom granicom razvlačenja od 235 N/mm^2 i garantiranim udarnim radom loma od 27 J pri ispitnoj temperaturi od 20°C (oznaka JR) [48].

Tehničke specifikacije kao što su kemijski sastav i mehanička svojstva spomenutog materijala, date su u tablicama 5. i 6.

Tablica 5. Kemijski sastav čelika S235JR [48]

Oznaka čelika	Kemijski sastav (%)								
	C maks. %	Mn maks. %	Si maks. %	P maks. %	S maks. %	N maks. %	Cu maks. %	Ostalo maks. %	CEV maks. %
S235JR	0,17	1,40	-	0,040	0,040	0,012	0,55	-	0,35

Tablica 6. Mehanička svojstva čelika S235JR [48]

Oznaka čelika	Mehanička svojstva		
	Granica razvlačenja, R_e (N/mm^2)	Vlačna čvrstoća, R_m (N/mm^2)	Produljenje, A_5 (%)
S235JR	235	360 – 510	26

Slika 55. prikazuje uzorke koje je potrebno pripremiti prije nego li se na istima provodi ispitivanje. Na uzorcima je prethodno na plazma rezačici pripremljena V priprema spoja.

Slika 55. Uzorci - čelične ploče S235JR

Priprema uzorka započinje mehaničkim obradom (brušenjem) površinskog sloja materijala zbog nečistoća koje bi mogle smanjiti zavarljivost materijala i narušiti rezultate ispitivanja.

Na sljedećoj slici prikazan je postupak brušenja (Slika 56. lijevo) i postupak pripajanja (Slika 56. desno) čime je priprema uzorka završena i spremna za ispitivanje funkcije praćenja senzora električnog luka.

Slika 56. Postupak brušenja (lijevo) i pripajanja (desno) uzorka

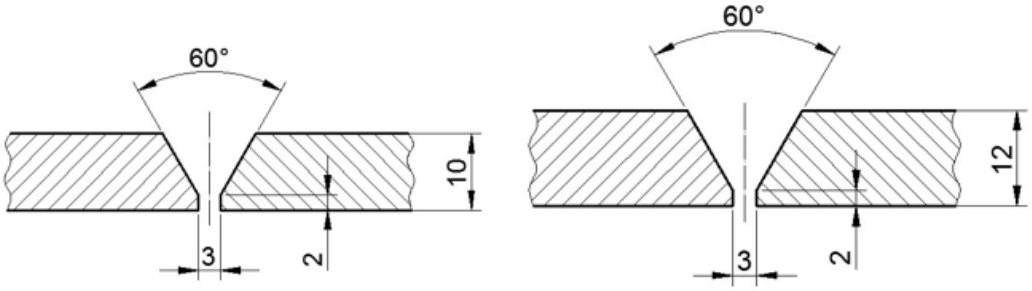
Slika 57. prikazuje rezultate pripreme uzorka nakon postupka brušenja i pripajanja.

Slika 57. Stezanje uzorka pomoću stezne naprave za pozicioner

5.3. Zavarivanje korijenskog prolaza

Prema definiranoj geometriji i obliku spoja, podešavanje parametara funkcije praćenja spoja senzora električnog luka provodit će se na sučeonoj V pripremi spoja.

Slika 58. prikazuje geometriju i oblik uzoraka nad kojima će se ispitivati parametri. Riječ je o uzorcima s različitim debljinama materijala od 10 mm i 12 mm.



Slika 58. Definirana geometrija i oblik spoja

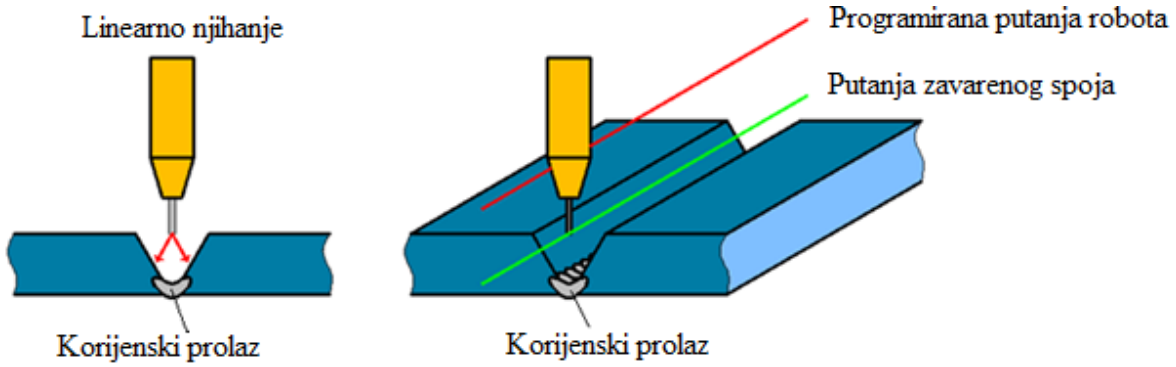
Prije samog podešavanja parametara senzora električnog najprije se zavaruje korijenski prolaz. Kod zavarivanja korijenskog prolaza, funkcija praćenja putanje senzora električnog luka nije uključena i ne postavlja se kutni pomak putanje u odnosu na nominalnu/programiranu putanju robota. Razlog tomu je vrlo teška uspostava stabilnog i simetričnog signala jakosti struje prilikom tehnike njihanja koji ne bi mogao ispratiti pomaknutu putanju zavarenog spoja. Prilikom zavarivanja korijenskog prolaza, prijenos metala vrši se kratkim spojevima uz linearnu tehniku njihanja.

Kao dodatni materijal koristi se pobakrena žica za zavarivanje EZ – SG 2 (prema HRN EN ISO 14341 – A) hrvatskog proizvođača Elektroda Zagreb za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm^2, promjera 1.2 mm, u zaštitnoj atmosferi mješavine plinova argona (Ar) i ugljikovog dioksida (CO_2) u omjeru 82: 18 (Ar:CO_2), odnosno mješavini plinova pod oznakom grupe M21 (prema ISO 14175) ili trgovačkog naziva Ferroline C18. Protok plina podešen je na 18 l/min.

Slika 59. prikazuje automatsko dovođenje dodatnog materijala i podešavanje protoka zaštitnog plina.

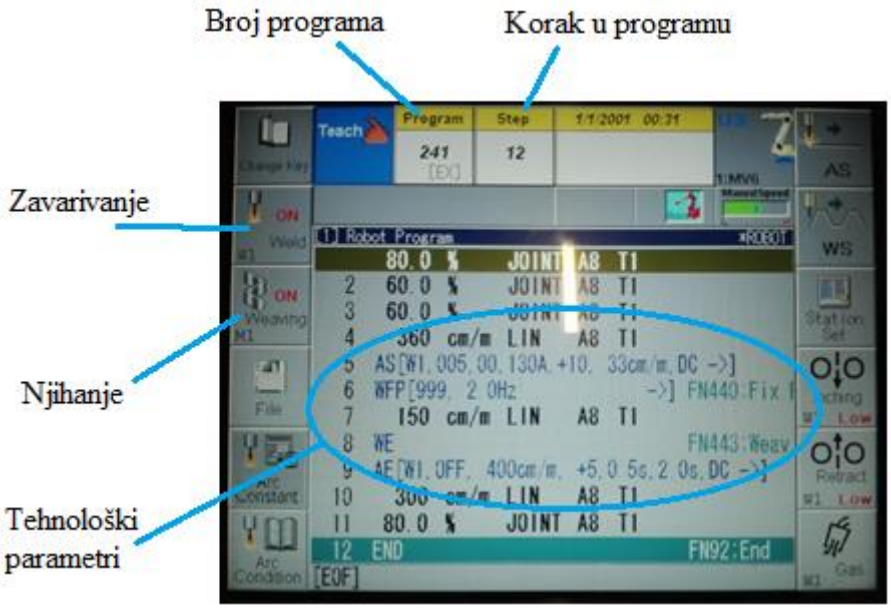
Slika 59. Automatska dobava žice EZ - SG 2 i podešavanje protoka zaštitnog plina M21

Slika 60. prikazuje zavarivanje korijenskog prolaza kratkim spojevima uz linearnu tehniku njihanja s isključenom funkcijom praćenja zavarenog spoja.



Slika 60. Zavarivanje korijenskog prolaza

Slika 61. prikazuje programski kod za robotizirano zavarivanje korijenskog prolaza te potrebne funkcije koje je potrebno uključiti.



Slika 61. Izgled programskog koda za robotizirano zavarivanje korijenskog prolaza

Programiranje korijenskog prolaza označeno je brojem programa 241. Sa slike 61. vidljivo je da su upaljene funkcija zavarivanja i funkcija njihanja. Funkcija praćenja putanje zavarenog spoja koju omogućuje senzor električnog luka nije uključena. Također, vidljivo je da se sam program sastoji od dva dijela: dio s koordinatama pozicija koje prati robotska ruka i dio za podešavanje tehnoloških parametara procesa MAG zavarivanja.

Tehnološki parametri zavarivanja korijenskog prolaza kratkim spojevima uz primijenjenu linearnu tehniku njihanja koji su podešeni prikazani su u tablici .

Tablica 7. Tehnološki parametri kod zavarivanja korijenskog prolaza

Zavarivanje korijenskog prolaza	
Parametar	**Vrijednost**
Struja zavarivanja	130 (A)
Brzina zavarivanja	33 (cm/min)
Duljina slobodnog kraja žice	10
Karakteristika senzora električnog luka	0
Frekvencija	2 (Hz)
Amplituda (lijeva / desna)	2 (mm) / 2 (mm)
Vrijeme zadržavanja (1/4 , centar, 3/4)	0,5 (s), 0 (s), 0,5 (s)
Tehnika njihanja	Linearna

Slika 62. prikazuje izgled zavarenog spoja korijenskog prolaza.

Slika 62. Izgled zavarenog spoja korijena

Rezultati zavarenog spoja vizualno i tehnološki zadovoljavaju kvaliteti.

5.4. Funkcija praćenja spoja senzora električnog luka

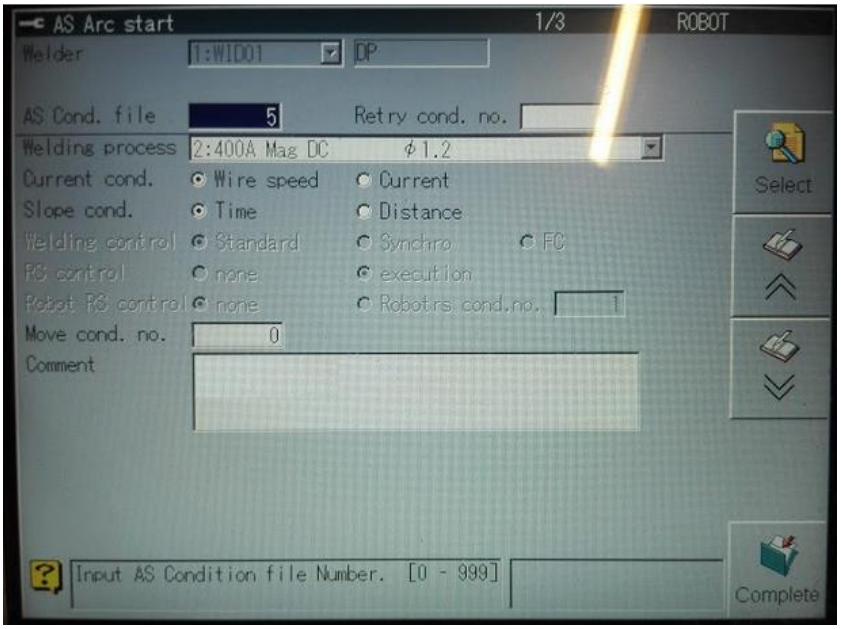
Budući da su uzorci spremni za eksperimentalno istraživanje u svrhu podešavanja optimalnih parametara radi postizanja praćenja putanje zavarenog spoja prilikom kutnog zakreta, u ovom dijelu bit će prikazano na koje sve parametre je potrebno obratiti pažnju.

Podešavanje parametara vrši se vezano uz:

- električni luk (engl. *Arc start*)
- tehniku njihanja (engl. *Weaving condition*)
- praćenje spoja (engl. S*tart/End tracking*)

5.4.1. Kreiranje nove datoteke i podešavanje parametara električnog luka (Arc start)

Slika 63. prikazuje kreiranje nove datoteke s parametrima za zavarivanje.

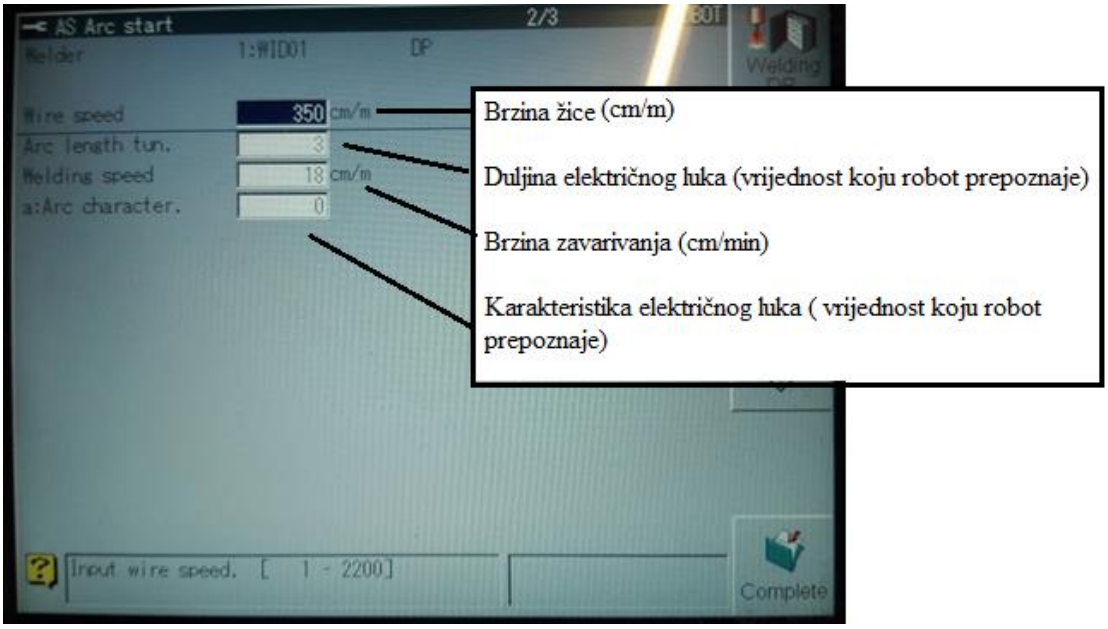


Slika 63. Kreiranje datoteke s parametrima za zavarivanje

U polje „*AS Cond. file*“ upisuje se broj datoteke koji nije zauzet od strane neke druge, već postojeće datoteke, a služi za izradu nove datoteke s parametrima zavarivanja. Polje „*Welding proces*“ nudi mogućnost izbora između nekoliko vrsta procesa zavarivanja koji su memorirani u upravljačku jedinicu. Može se izabrati i vrsta prijenosa materijala u električnom luku kao što je konvencialno zavarivanje ili impulsno zavarivanje. „*Curent cond*.“ područje zahtijeva od operatera da odabere da li će se jačina struje definirati preko zadane jakosti struje, odnosno prema brzini dodavanja žice. Funkcijom „*Slope cond*.“ definira se da li će se kontrola nagiba vršiti od početka uspostave električnog luka dok robot miruje (bira se opcija „*Time*“ –

vrijeme), ili za vrijeme gibanja robota (bira se opcija „*Distance*“ – udaljenost). U područje „*Comment*“ moguće je upisati napomenu ili dodati komentar [49].

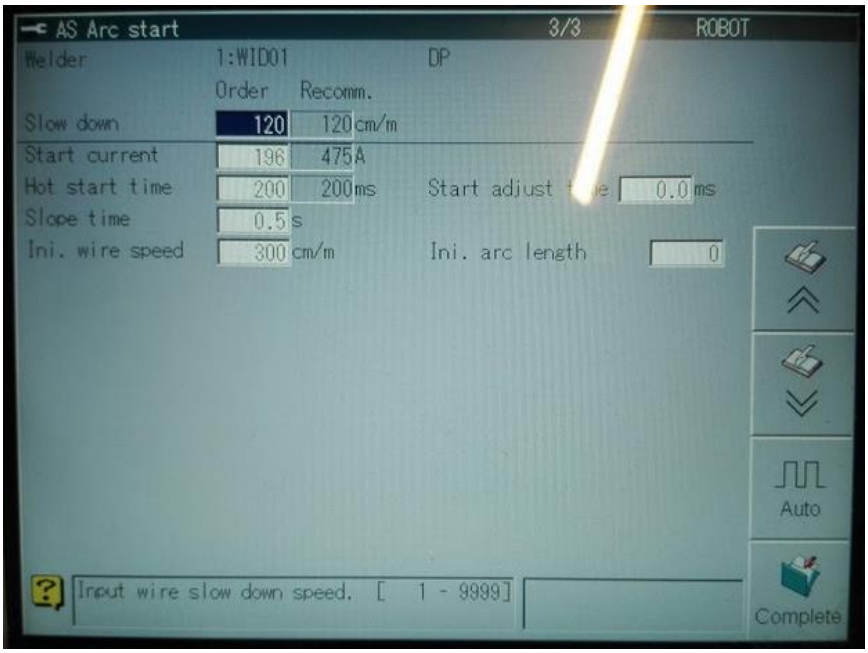
Slika 64. prikazuje prozor za podešavanje parametara električnog luka.



Slika 64. Podešavanje parametara električnog luka

Parametri duljina električnog luka (engl. *Arc length tun.*) i karakteristika električnog luka (engl. *Arc character.)* nemaju mjernu jedinicu, već je riječ o parametrima čiju vrijednost robot prepoznaje [49].

Slika 65. prikazuje dodatne parametre električnog luka koje je moguće podesiti.

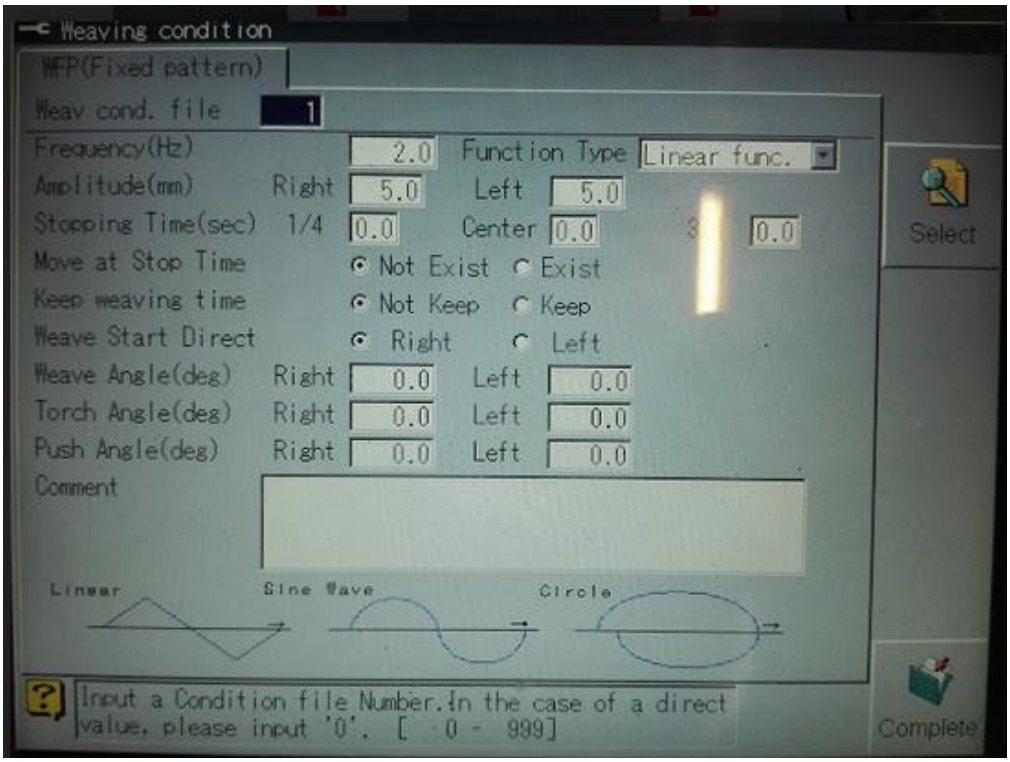


Slika 65. Dodatni parametri za podešavanje električnog luka

5.4.2. Podešavanje parametara vezanih uz tehniku njihanja (Weaving start)

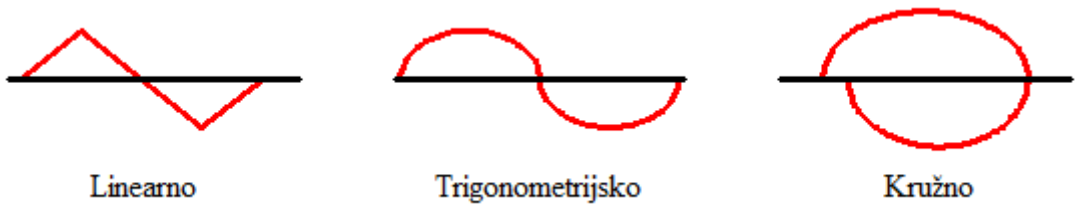
Nakon definiranih parametara električnog luka, da bi funkcija praćenja spoja funkcionirala, obavezno je potrebno definirati parametre vezane uz tehniku njihanja. Podešavanje parametara njihanja provodi se funkcijom „*Weaving condition*“.

Slika 66. prikazuje podešavanje parametara vezanih uz tehniku njihanja.



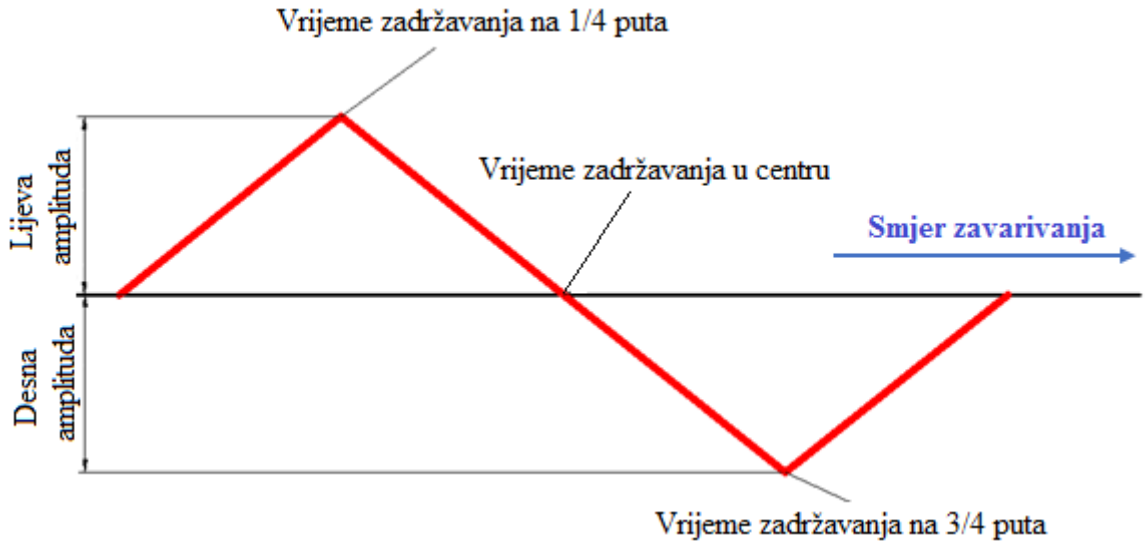
Slika 66. Podešavanje parametara vezanih uz tehniku njihanja

U polje „*Weav cond. file*“ upisuje se broj slobodne datoteke, odnosno broj koji prethodno nije zauzet, a služi za izradu nove datoteke i podešavanje parametara njihanja. Vrlo važni parametri koji se podešavaju su frekvencija, vrsta funkcije njihanja, amplituda, vrijeme zadržavanja. Frekvencija predstavlja broj njihanja u sekundi. Vrsta, odnosno oblik njihanja koje je moguće podesiti u polju „*Function Type*“ su: „*Linear*“, „*Sine Vave*“ i „*Circle*“(Slika 67.).



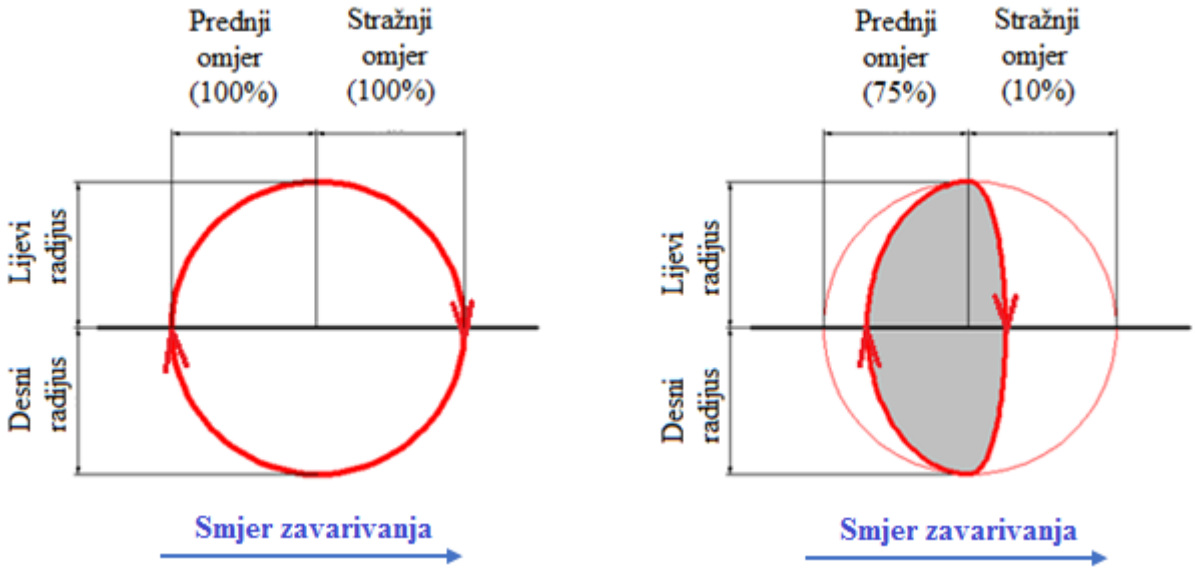
Slika 67. Tehnike njihanja koje je moguće podesiti: a)Linearno, b)Trigonometrijsko, c)Kružno njihanje

Ovisno o odabranoj vrsti, odnosno obliku njihanja, otvara se poseban prozor za podešavanje parametara. Primjerice, kod linearne tehnike potrebno je upisat vrijednost iznosa lijeve i desne amplitude te vrijeme zadržavanja u krajnjoj lijevoj poziciji, centru i krajnjoj desnoj poziciji. S obzirom da se provodi funkcija praćenja spoja, kod svakog ispitivanja praćenja spoja, njihanje se vrši bez zadržavanja da se ne bi poremetio proces praćenja. Vrijeme zadržavanja iz tog razloga podešava se na nulu. Slika 68. prikazuje parametre za podešavanje kod linearne tehnike njihanja.



Slika 68. Podešavanje parametara kod linearne tehnike njihanja

Kod kružnog njihanja potrebno je definirati vrijednost radijusa (lijevi/desni), te omjer između prednje i stražnje kružnice izražen u postotku (%). Slika 69. prikazuje parametre za podešavanje kod kružne tehnike njihanja.

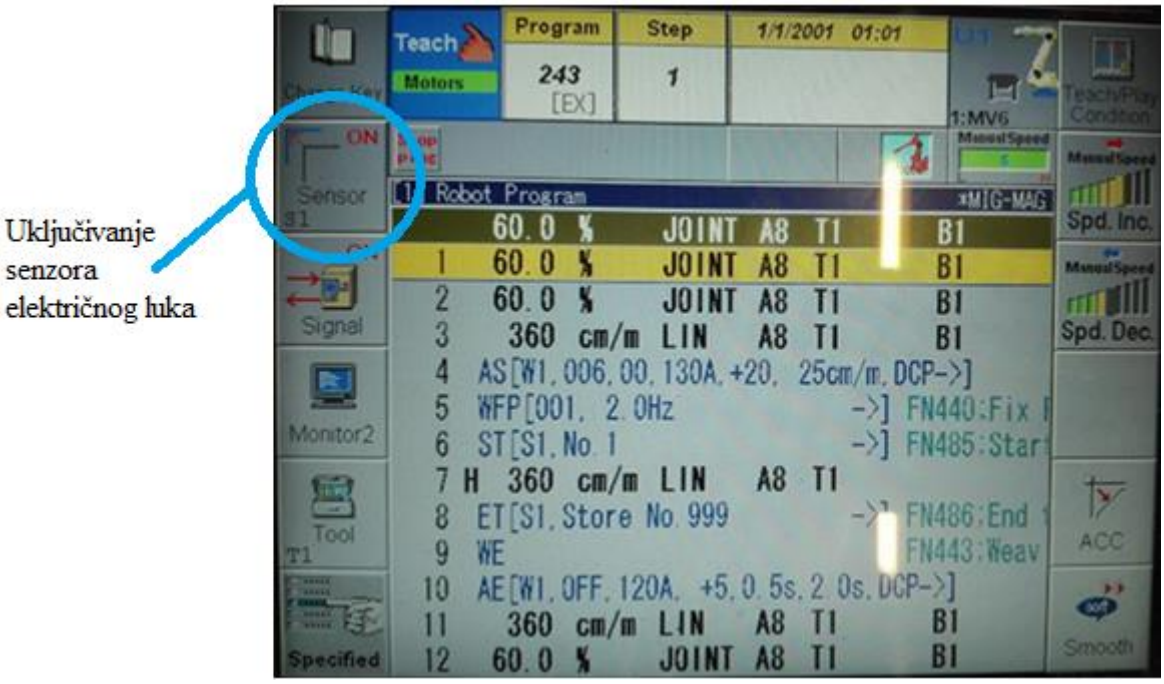


Slika 69. Podešavanje parametara kod kružne tehnike njihanja

5.4.3. Podešavanje parametara funkcije praćenja spoja senzora električnog luka

Robotska stanica opremljena je dodatnom opremom kao što je senzor električnog luka AX-AR koji omogućuje praćenje spoja zavara u situacijama kada dolazi do pomaka ili deformacije radnog komada uzrokovanog velikim unosom topline uslijed zavarivanja, mehaničkom deformacijom ili sl. Prilikom programiranja, osim podešavanja tehnoloških parametara vezanih uz električni luk i definiranja koordinata točaka, kao što je to slučaj kod zavarivanja korijenskog prolaza, potrebno je uključiti senzor električnog luka i podesiti parametre vezane uz funkciju početka praćenja (engl. *start tracking* – ST) i završetka praćenja (engl. *end tracking* – ET).

Slika 70. prikazuje uključivanje senzora električnog luka čime se omogućava funkcija praćenja zavarenog spoja.

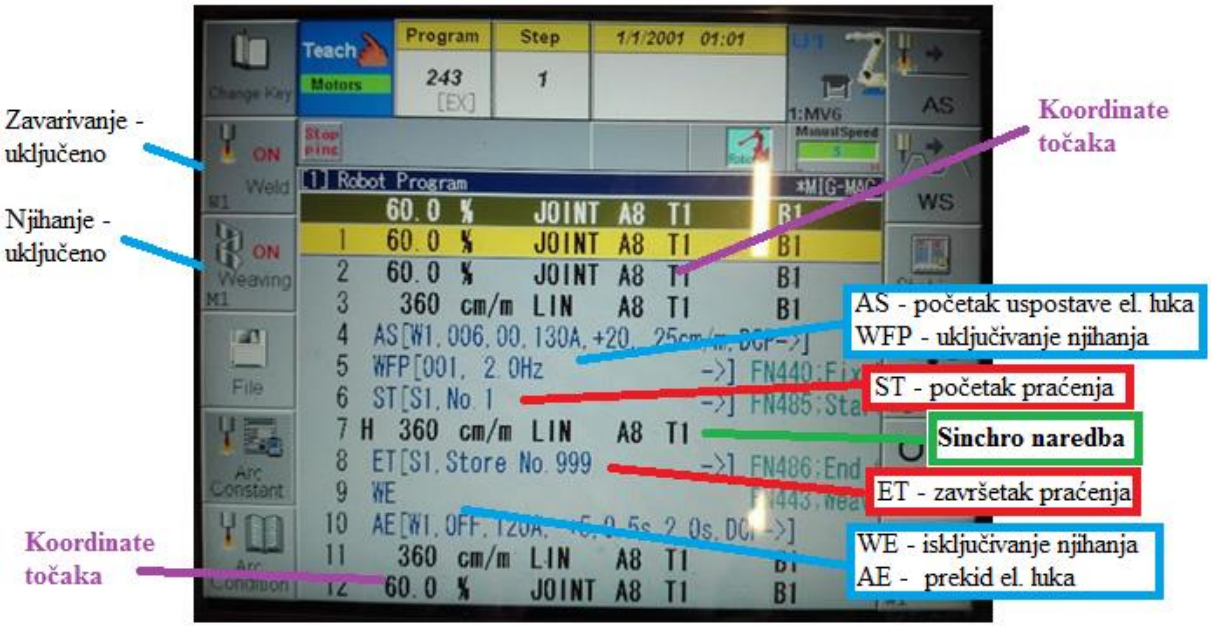


Slika 70. Uključivanje senzora električnog luka

Naredbe za početak praćenja (ST – *engl. start tracking*) i završetak praćenja (ET – engl. *end tracking*) potrebno je programirati nakon definiranja naredbe i parametara vezanih uz uspostavu električnog luka (AS – engl *arc start*) i tehniku njihanja (WFP – engl. *weaving at fixed pattern*). Naredba za završetak praćenja (ET – engl. *end tracking*) programira se prije naredbe za završetak njihanja (WE – engl. *weaving end*) i naredbe za prekidanje električnog luka (AE – engl. *arc end*). Također, da bi se funkcija praćenja mogla izvršiti, potrebno je u području „EDIT“ uključiti naredbu „SYNCHRO“ kojom se omogućuje usklađivanje korekcijskog gibanja s koordinatnim sustavom radnog stola. Dokaz da je naredba „SYNCHRO“

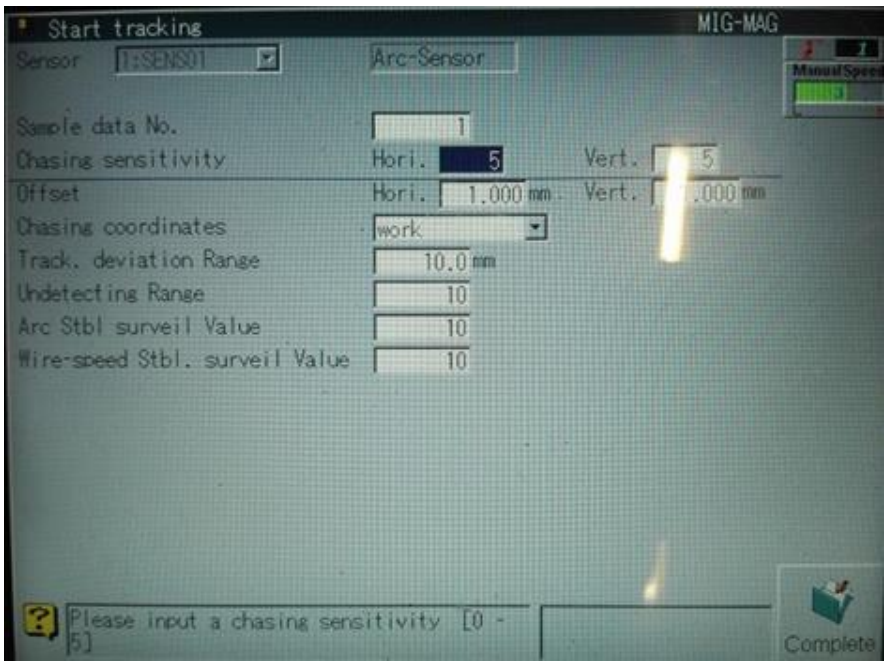
uključena dokazuje slovo „H“ u programu. Obično se naredba „SINCHRO“, tj slovo „H“ pojavljuje ispred koraka za putanju zavarivanja u programu [49].

Slika 71. prikazuje programirani kod koji se sastoji od definiranih koordinata točaka, tehnoloških parametara vezanih za električni luk te parametara vezanih uz funkciju praćenja zavarenog spoja.



Slika 71. Prikaz programa za praćenje zavarenog spoja

Slika 72. prikazuje stvaranje nove datoteke s parametrima vezanih uz funkciju praćenja zavarenog spoja.



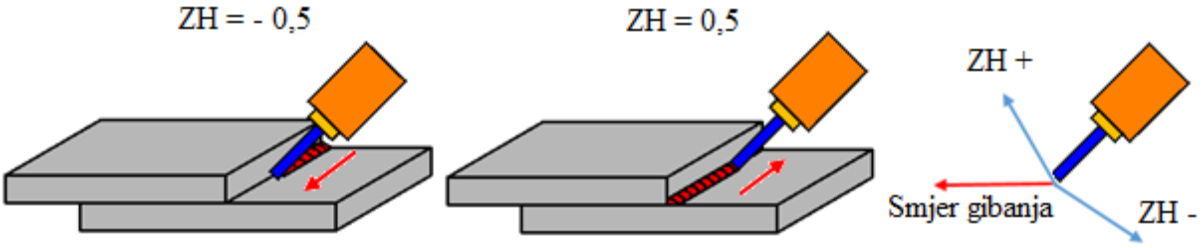
Slika 72. Podešavanje parametara funkcije praćenja zavarenog spoja

Polje „ *Sample data No*.“ zahtjeva upis slobodnog broja, koji prethodno nije već zauzet u memoriji robota, a broj predstavlja naziv nove datoteke u kojoj se podešavaju parametri funkcije praćenja [49].

Sljedeći parametri koje je potrebno podesiti su „*Chasing sensitivity*“ odnosno brzina korekcije. Horizontalna brzina korekcije predstavlja horizontalnu brzinu ispravljanja položaja pištolja, dok vertikalna brzina korekcije predstavlja vertikalnu brzinu ispravljanja položaja pištolja. Vrijednosti koje se mogu upisati u polje horizontalne i vertikalne brzine korekcije su brojevi od 0 do 5, pri čemu 0 znači da se korigiranje položaja pištolja neće izvršiti. Broj 1 znači mala brzina korekcije, dok broj 5 predstavlja najveću brzinu korekcije [49].

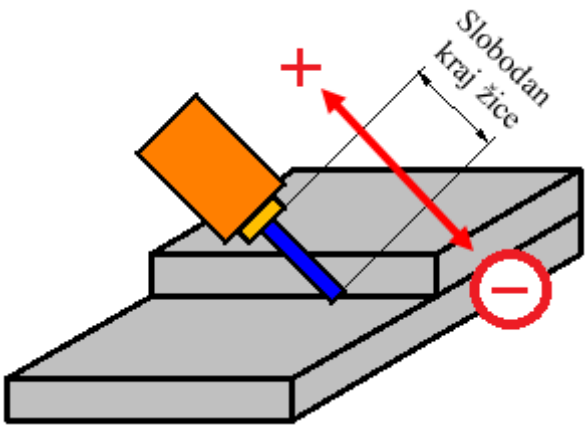
Polje „*Offset*“ odnosno horizontalno i vertikalno odstupanje pištolja može poprimit vrijednost od - 9,99 mm do + 9,99 mm, pri čemu odabrana vrijednost ovisi o vrsti spoja, primijenjenoj tehnici zavarivanja i sl. Horizontalno odnosno vertikalno odstupanje pištolja predstavlja iznos odstupanja u horizontalnom odnosno vertikalnom smjeru koordinatnog sustava pištolja od kompenzirane putanje [49].

Slika 73. prikazuje primjer horizontalnog odstupanja pištolja u odnosu na kompenziranu putanju kod primijenjene lijeve i desne tehnike zavarivanja.



Slika 73. Odstupanje pištolja u horizontalnoj ravnini [49]

Slika 74. prikazuje primjer vertikalnog odstupanja pištolja u odnosu na kompenziranu putanju.

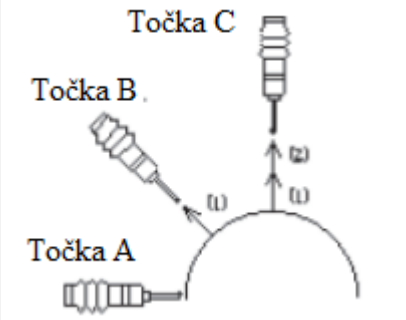
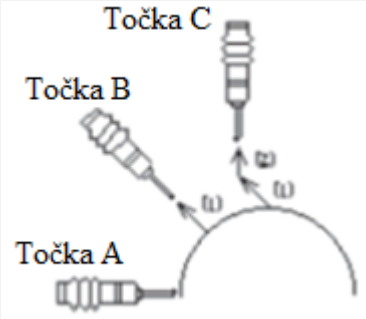


Slika 74. Odstupanje pištolja u vertikalnoj ravnini [49]

Koordinatni sustav korigiranja „*Chasing coordinates*“ nudi opciju izbora između koordinatnog sustava pištolja (engl. *Torch*) i koordinatnog sustava radnog komada (engl. *Work*).

Tablica 8. prikazuje korigiranje položaja prema koordinatnom sustavu pištolja i radnog komada.

Tablica 8. Metode praćenja s obzirom na koordinatni sustav [49]

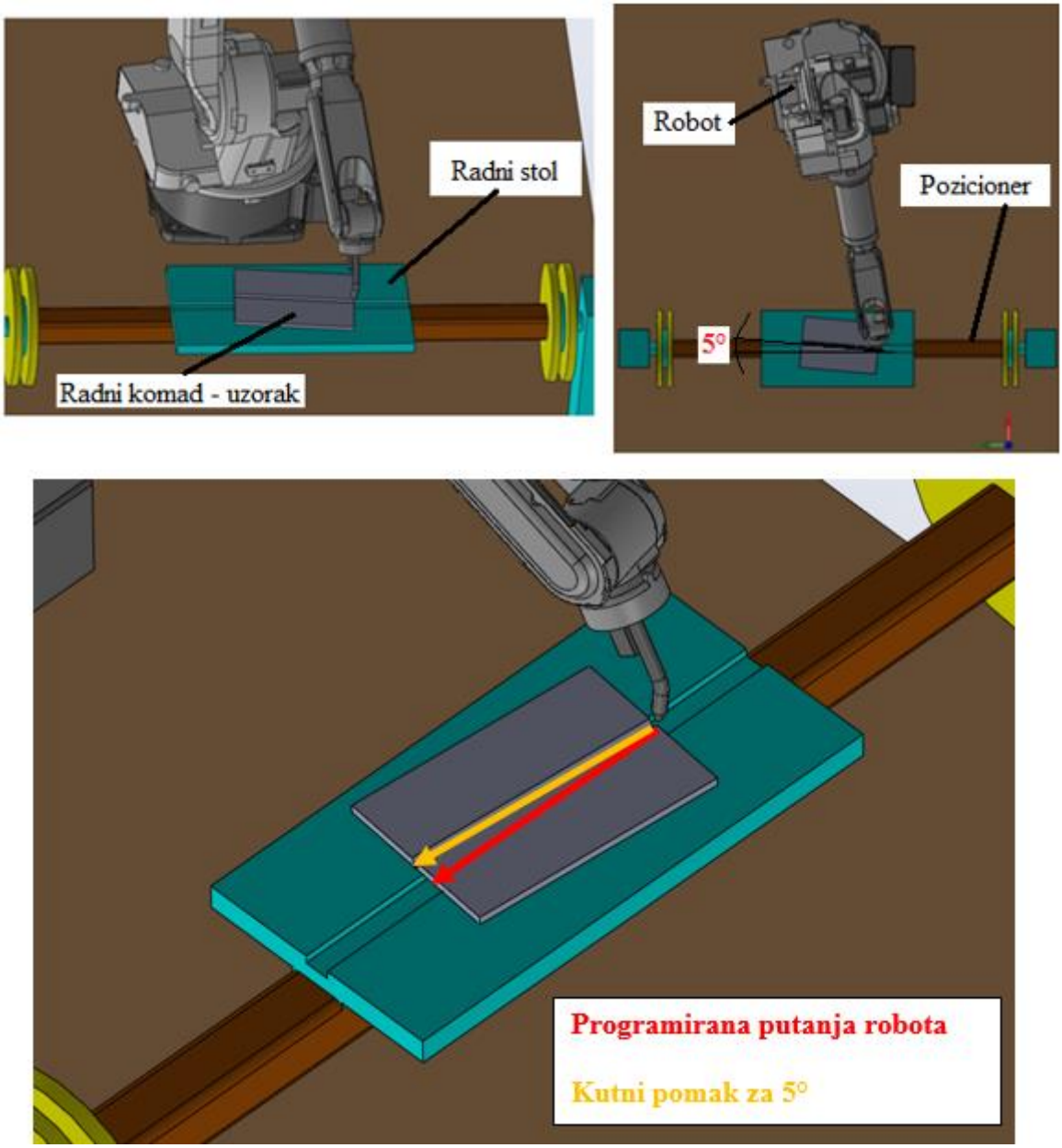
Koordinatni sustav	**Pištolj (Torch)**	**Radni komad (Work)**
Putanja korekcije	 1) iznos korekcije u točci B 2) iznos korekcije u točci C	 1) iznos korekcije u točci B 2) iznos korekcije u točci C
Primjena	Za ravne linije Za ravne linije s blagim nagibom Za ravne linije s promjerom od 100 mm ili za kružne oblike	Za ravne linije i kutove Za ravne linije promjera 100 mm ili manje kružne oblike

U polje parametra „*Track. Deviation Range*“, odnosno širina praćenja devijacije unosi se vrijednost u rasponu od 1 do 99,9, a odabrana vrijednost predstavlja maksimalnu vrijednost odmaka do kojeg će senzor vršiti praćenje. Prema preporuci proizvođača iznos ove vrijednosti postavlja se okvirno za 5 – 10 mm veća od maksimalne devijacije komada [49].

5.5. Planiranje procesa zavarivanja s uključenom funkcijom praćenja

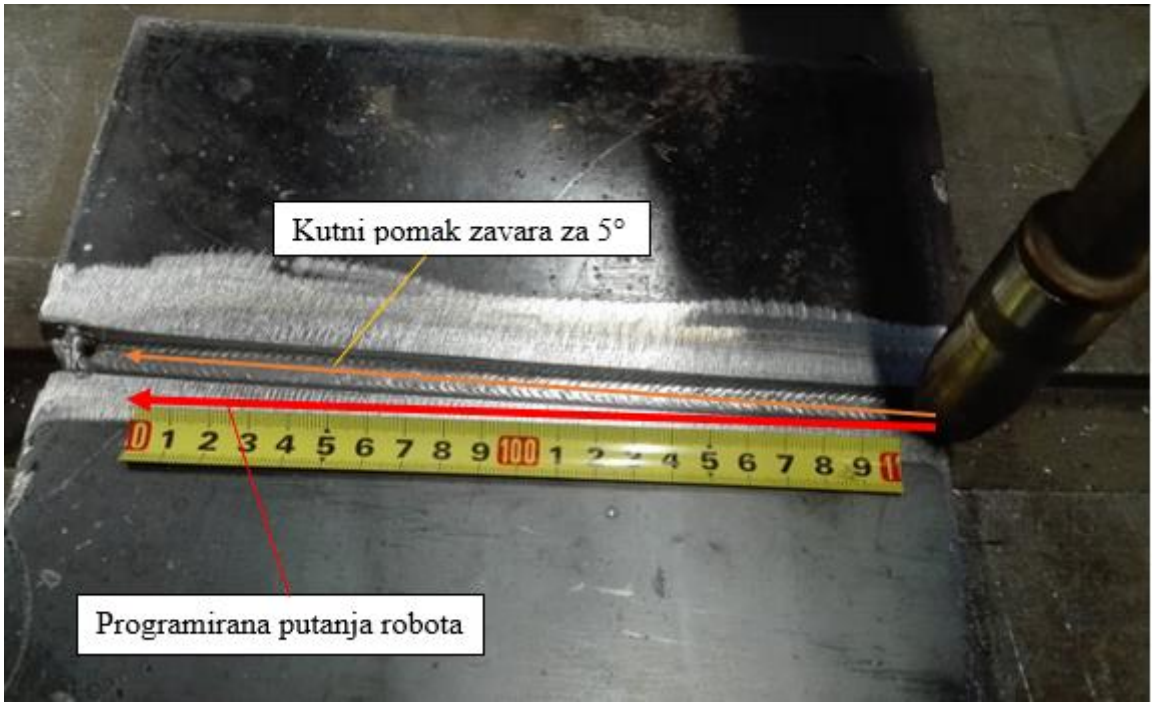
Ispitivanje funkcije praćenja zavarenog spoja senzora električnog luka provedeno je na način da su pripremljeni uzorci debljine 10 mm i 12 mm sa zavarenim korijenskim prolazom kutno zamaknuti u horizontalnoj ravnini za 5°.

Slika 75. prikazuje na kutni pomak uzorka u horizontalnoj ravnini osmišljen u CAD programu SolidWorks.



Slika 75. Kutni pomak uzorka za 5° osmišljen u CAD programu

Slika 76. prikazuje realan primjer postavljanje uzorka na radni stol pozicionera pod kutom zakreta od 5° u odnosu na programiranu putanju robota u horizontalnoj ravnini.



Slika 76. Kutni pomak uzorka za 5° od programirane putanje robota

Kao i kod korijenskog prolaza, za funkciju praćenja spoja također je korištena zaštitna plinska mješavina oznake M21 (Ferroline C18 – 82% Ar : 18% CO_2) te dodatni materijal žica oznake EZ – SG 2 promjera 1,2 mm. Prilikom programiranja putanje, iznos duljine praćenja zavarenog spoja postavljen je na 100 mm kod svih uzoraka.

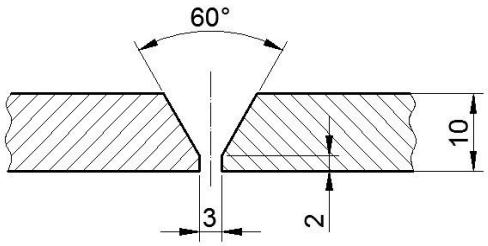
5.5.1. Podešavanje parametara – vrsta prijenosa metala u električnom luku

Podešavanjem parametara vezanih uz vrstu prijenosa metala u električnom luku istražuje se utjecaj različitih vrsta prijenosa metala u električnom luku poput kratkih spojeva i impulsnog zavarivanja na funkciju praćenja zavarenog spoja senzora električnog luka, te se vizualno kontrolira kvaliteta zavarenog spoja. U ovom poglavlju bit će podešeni parametri senzora električnog luka za zavarivanje kratkim spojevima i impulsno zavarivanje.

Tablica 9. prikazuje podešene parametre i rezultat funkcije praćenja senzora električnog luka kod zavarivanja kratkim spojevima.

Tablica 9. Podešavanje parametra način prijenosa metala - zavarivanje kratkim spojevima

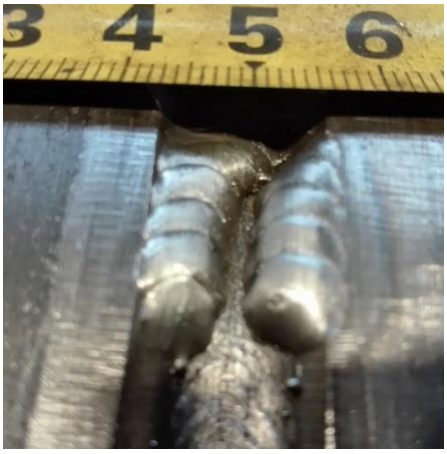
Priprema spoja



Prijenos metala kratkim spojevima

Parametar			**Vrijednost / odabir**
Električni luk	**Vrsta prijenosa metala**		**Kratki spojevi**
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		15
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Amplituda	Lijeva	2,2 mm
		Desna	2,2 mm
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Linearno
Funkcija praćenja	Brzina korekcije	Horizontalna	5
		Vertikalna	5
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5
	Širina praćenja devijacije		10 mm

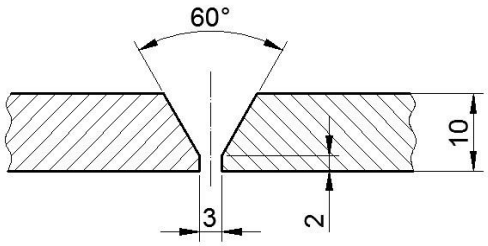
Rezultat funkcije praćenja zavarenog spoja



Tablica 10. prikazuje podešene parametre i rezultat funkcije praćenja senzora električnog luka kod impulsnog zavarivanja.

Tablica 10. Podešavanje parametra način prijenosa metala– impulsno zavarivanje

Priprema spoja



Prijenos metala impulsnim zavarivanjem

Parametar			**Vrijednost / odabir**
Električni luk	**Vrsta prijenosa metala**		**Impulsno zavarivanje**
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		15
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Amplituda	Lijeva	2,2 mm
		Desna	2,2 mm
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Linearno
Funkcija praćenja	Brzina korekcije	Horizontalna	5
		Vertikalna	5
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5
	Širina praćenja devijacije		10 mm

Rezultat funkcije praćenja zavarenog spoja

Analiza i komentari na tablice 9. i 10.

Funkcija praćenja zavarenog spoja senzora električnog luka nije dala najbolje rezultate na temelju podešenih parametara. Vidljivo je u tablici 9. da na temelju definiranih parametara, senzor električnog luka nije uspio ispratiti zavareni spoj čitavom duljinom (100 mm), a vizualnom kontrolom vidljivo je da ovakav izgled zavara nije kvalitetan, ni tehnološki zadovoljavajući. Za ovakav izgled zavarenog spoja postoji mogućnost da su postojale smetnje u signalu i senzor nije na temelju geometrije žlijeba mogao mjeriti vrijednosti parametara električnog luka što je rezultiralo lošom izvedbom zavara.

Kod impulsnog zavarivanja (Tablica 10.), funkcija praćenja zavarenog spoja senzora električnog luka kvalitetno je ispratila čitavu duljinu zavarenog spoja (100 mm). U početnih 20 mm ima blagog proširenja zavara, no nakon što je senzor na temelju mjerenih podataka električnog luka uspio prepoznati geometriju i oblik žlijeba, ostvarila se korekcija putanje u odnosu na programiranu putanju robota i kvalitetno je ispraćena čitava duljina zavarenog spoja.

Činjenica je da se kod impulsnog zavarivanja postiže stabilniji električni luk u odnosu na zavarivanje kratkim spojevima. Kod kratkih spojeva podešeni su visoki parametri i odvajanje kapljica je neperiodičko što dovodi do prskanja i variranja unosa topline u materijal. To može biti uzrok smetnji u povratnom signalu kod senzora električnog luka i stoga je zavarivanje kratkim spojevima dalo loše rezultate. Kod impulsnog zavarivanja prijenos metala je kontroliran, odnosno odvajanje kapljica je periodično, a električni luk stabilan te nema smetnji koje bi utjecale na osjetljivost senzora električnog luka, zbog čega je izvrsno ispraćena čitava duljina zavarenog spoja uz dobivanje tehnološki kvalitetnog spoja, vizualno gledano.

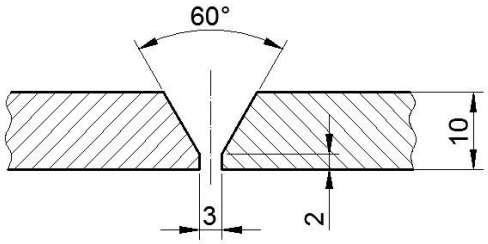
5.5.2. Podešavanje parametara – brzina korekcije („Chasing sensitivity“)

Sljedeći uzorci zavareni su impulsnim zavarivanjem uz kutni pomak za 5° u odnosu na programiranu putanju robota. Kod funkcije praćenja spoja senzora električnog luka podešene su različite vrijednosti parametra „*Chasing sensitivity*“, odnosno brzina korekcije u iznosima od 0 – 5. Podešeni parametri i rezultati funkcije praćenja dati su u tablicama 11. – 16.

Tablica 11. prikazuje podešavanje parametra funkcije praćenja - brzinu korekcije.

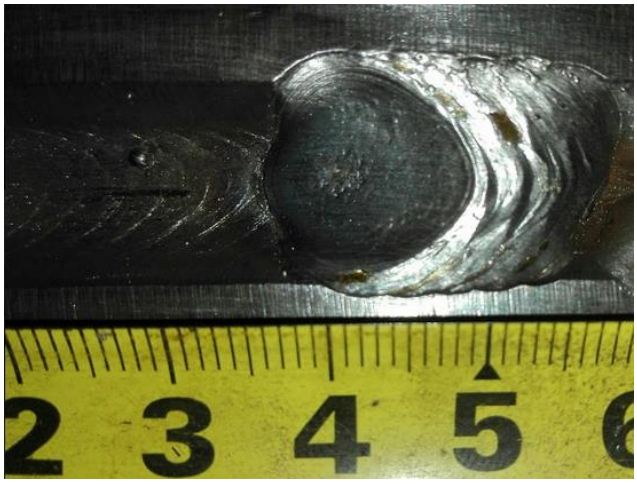
Tablica 11. Podešavanje parametra - brzina korekcije 0

Priprema spoja



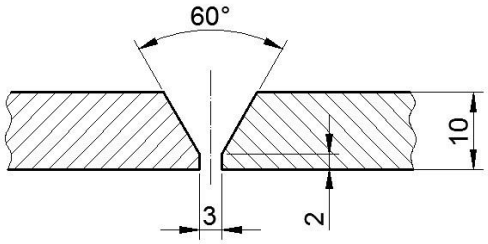
Parametar			**Vrijednost / odabir**
Električni luk	Vrsta prijenosa metala		Impulsno zavarivanje
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		15
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Amplituda	Lijeva	2,5 mm
		Desna	2,5 mm
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Linearno
Funkcija praćenja	**Brzina korekcije**	**Horizontalna**	**0**
		Vertikalna	**0**
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5
	Širina praćenja devijacije		10 mm

Rezultat funkcije praćenja zavarenog spoja



Tablica 12. Podešavanje parametra - brzina korekcije 1

Priprema spoja

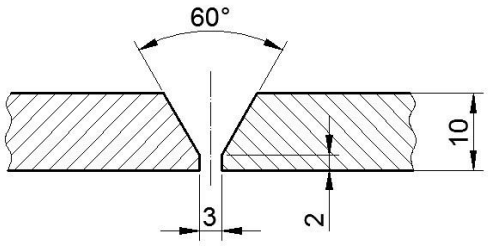


Parametar			Vrijednost / odabir
Električni luk	Vrsta prijenosa metala		Impulsno zavarivanje
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		15
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Amplituda	Lijeva	3 mm
		Desna	3 mm
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Linearno
Funkcija praćenja	**Brzina korekcije**	**Horizontalna**	**1**
		Vertikalna	**1**
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5
	Širina praćenja devijacije		10 mm

Rezultat funkcije praćenja zavarenog spoja

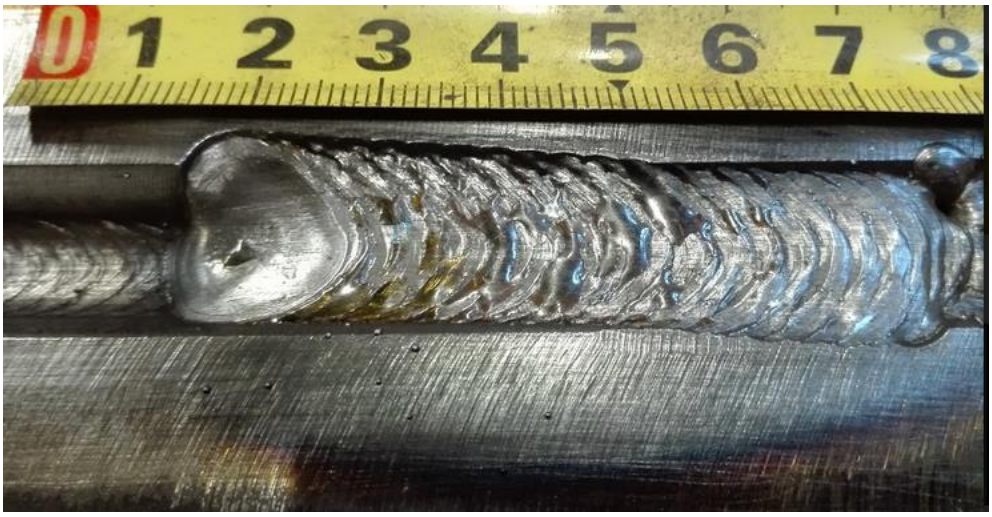
Tablica 13. Podešavanje parametra - brzina korekcije 2

Priprema spoja



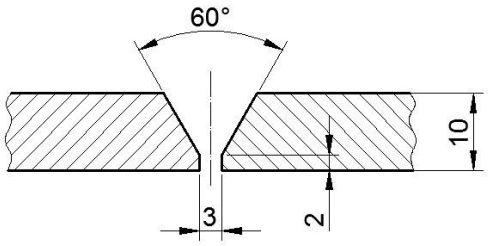
Parametar			Vrijednost / odabir
Električni luk	Vrsta prijenosa metala		Impulsno zavarivanje
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		15
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Amplituda	Lijeva	2,5 mm
		Desna	2,5 mm
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Linearno
Funkcija praćenja	**Brzina korekcije**	**Horizontalna**	**2**
		Vertikalna	**2**
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5
	Širina praćenja devijacije		10 mm

Rezultat funkcije praćenja zavarenog spoja



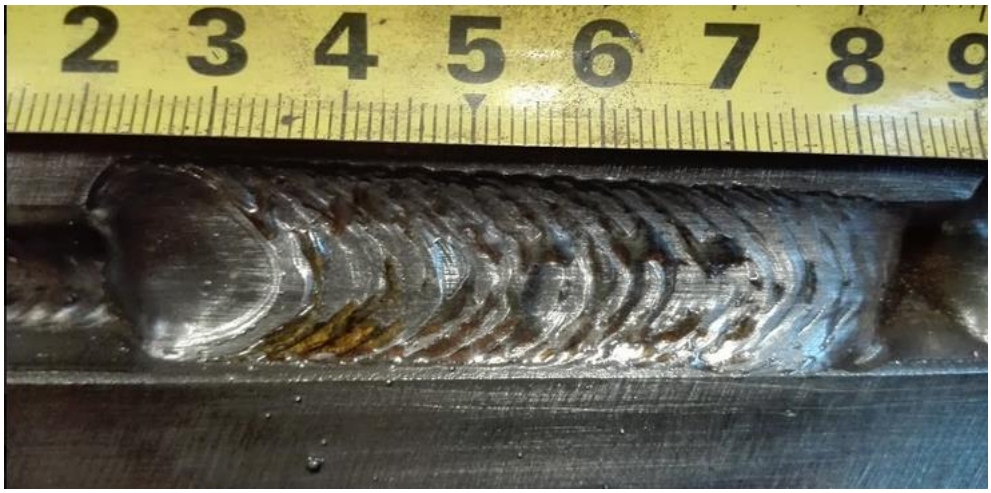
Tablica 14. Podešavanje parametra - brzina korekcije 3

Priprema spoja



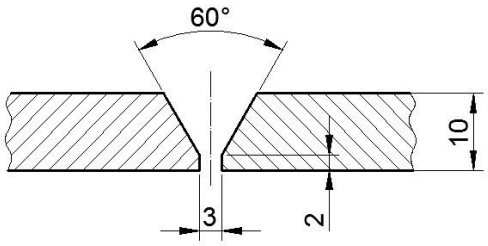
Parametar			Vrijednost / odabir
Električni luk	Vrsta prijenosa metala		Impulsno zavarivanje
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		15
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Amplituda	Lijeva	2,5 mm
		Desna	2,5 mm
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Linearno
Funkcija praćenja	**Brzina korekcije**	**Horizontalna**	**3**
		Vertikalna	**3**
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5
	Širina praćenja devijacije		10 mm

Rezultat funkcije praćenja zavarenog spoja



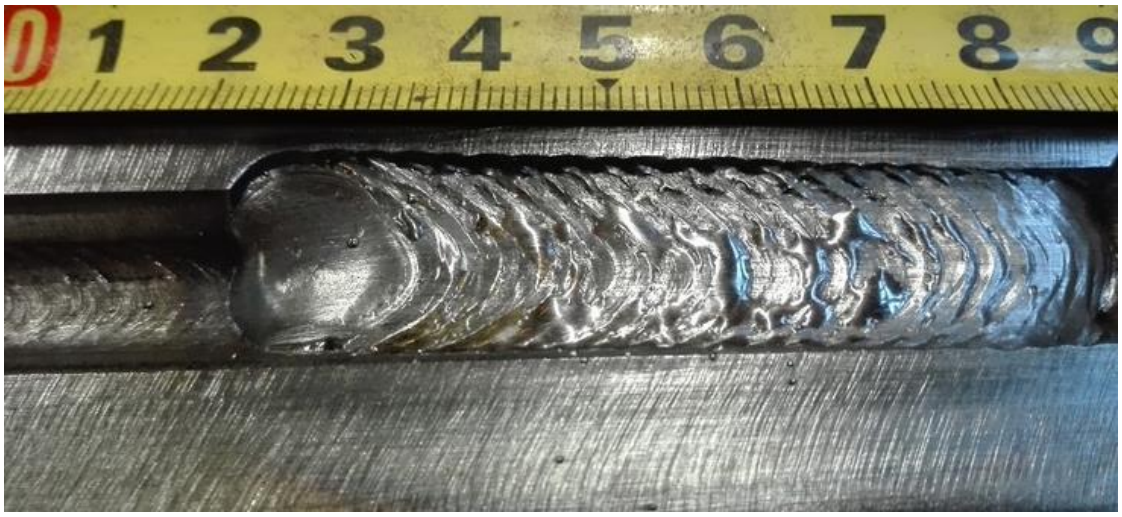
Tablica 15. Podešavanje parametra - brzina korekcije 4

Priprema spoja



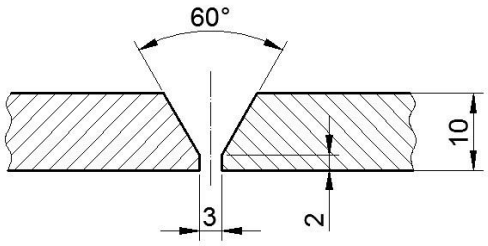
Parametar			Vrijednost / odabir
Električni luk	Vrsta prijenosa metala		Impulsno zavarivanje
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		15
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Amplituda	Lijeva	2,5 mm
		Desna	2,5 mm
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Linearno
Funkcija praćenja	**Brzina korekcije**	**Horizontalna**	**4**
		Vertikalna	**4**
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5
	Širina praćenja devijacije		10 mm

Rezultat funkcije praćenja zavarenog spoja



Tablica 16. Podešavanje parametra - brzina korekcije 5

Priprema spoja



Parametar			Vrijednost / odabir
Električni luk	Vrsta prijenosa metala		Impulsno zavarivanje
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		15
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Amplituda	Lijeva	2,5 mm
		Desna	2,5 mm
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Linearno
Funkcija praćenja	**Brzina korekcije**	**Horizontalna**	**5**
		Vertikalna	**5**
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5
	Širina praćenja devijacije		10 mm

Rezultat funkcije praćenja zavarenog spoja

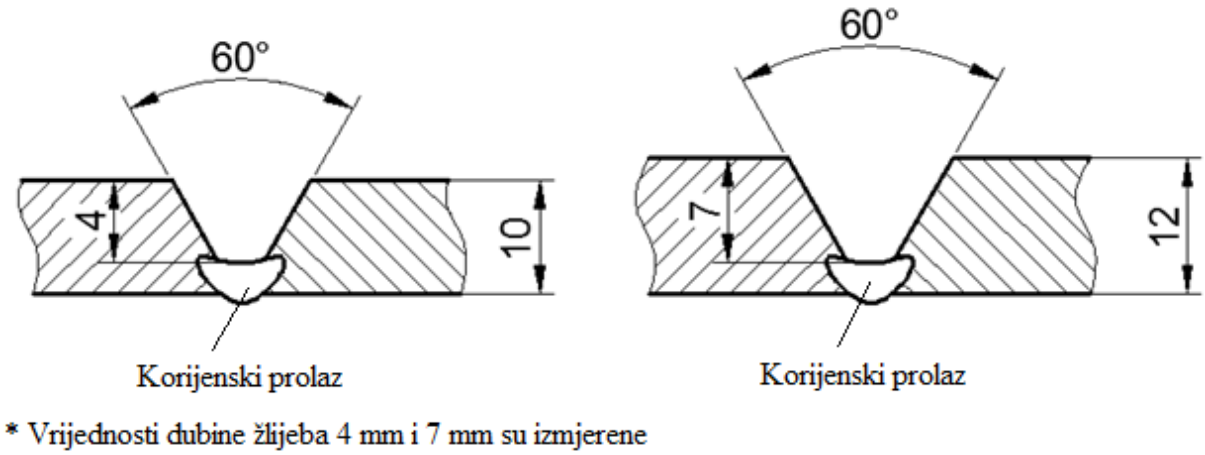
Analiza i komentari na tablice 11.,12.,13.,14.,15. i 16.

Na temelju rezultata podešavanja parametra „*Chasing sensitivity*“, odnosno horizontalne i vertikalne brzine korekcije, zapaženo je da navedeni parametar ima snažan utjecaj na funkciju praćenja zavarenog spoja. Kod podešavanja vrijednosti horizontalne i vertikalne brzine korekcije na 0, praćenje zavarenog spoja nije provedeno. Kod podešavanja vrijednosti na 1, praćenje spoja nije uspješno. Događa se prekid zavarivanja, a zavareni spoj prelazi izvan geometrije žlijeba. Povećavajući vrijednost parametra, rezultati praćenja putanje i kvaliteta zavarenog spoja se poboljšavaju, ali greške i dalje postoje. U tablici 16. s podešenom vrijednošću brzine korekcije 4 vidljivo je da zavareni spoj ne prati korigiranu putanju, te zavareni spoj naginje na desnu stranu žlijeba, što ga čini nesimetričnim i ostavlja kanal na lijevoj strani žlijeba. U tablici 14. s podešenom korekcijom brzine na 3, ista greška je još jače izražena. Kod podešene vrijednosti parametra horizontalne i vertikalne brzine korekcije na 5 postiže se vrlo kvalitetno ispraćena putanja zavarenog spoja uz tehnološki kvalitetan zavareni spoj, vizualno gledano. Zaključuje se da brzina horizontalne i vertikalne korekcije utječe na osjetljivost senzora električnog luka i na preciznost praćenja zavarenog spoja.

5.5.3. Podešavanje parametara – promjena oblika i geometrije žlijeba i promjena tehnike njihanja

U ovom poglavlju ispituje se funkcija praćenja spoja s identičnim parametrima iz poglavlja 5.5.2. Promijenjena je jedino debljina materijala s 10 mm na 12 mm i pritom je došlo do promjene vrijednosti dubine žlijeba s 4 mm na 7 mm.

Slika 77. prikazuju razliku u geometriji između dva uzorka debljine 10mm i 12mm sa zavarenim korijenskim prolazom.

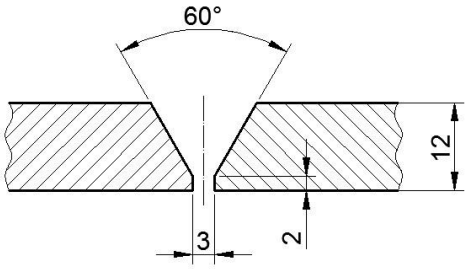


Slika 77. Razlike u obliku i geometriji uzoraka

Tablica 17. prikazuje rezultate funkcije praćenja uslijed promjene oblika i geometrije.

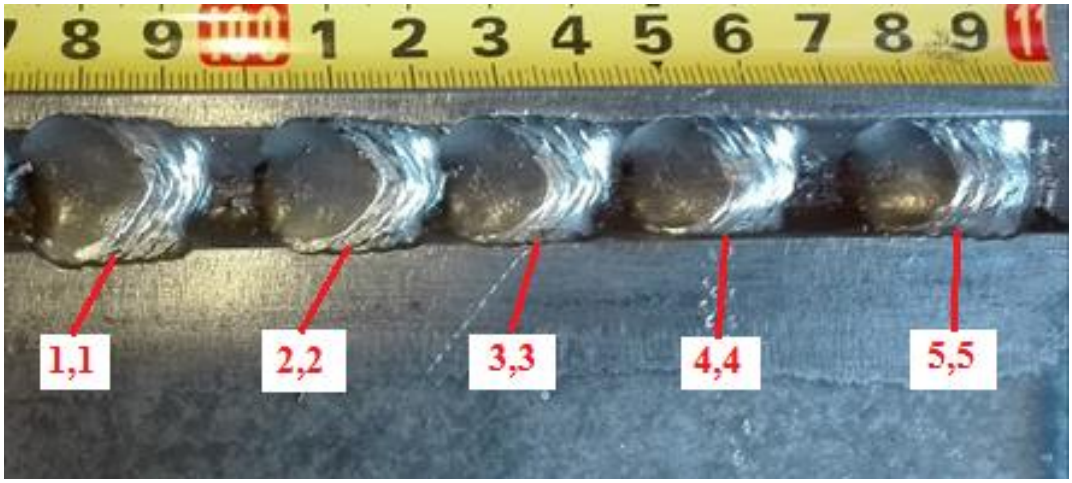
Tablica 17. Podešavanje parametara - promjena oblika i geometrije

Priprema spoja



Parametar			Vrijednost / odabir
Električni luk	Vrsta prijenosa metala		Impulsno zavarivanje
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		25
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Amplituda	Lijeva	3,5 mm
		Desna	3,5 mm
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Linearno
Funkcija praćenja	**Brzina korekcije**	**Horizontalna**	**Označeno na slici**
		Vertikalna	**Označeno na slici**
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5
	Širina praćenja devijacije		10 mm

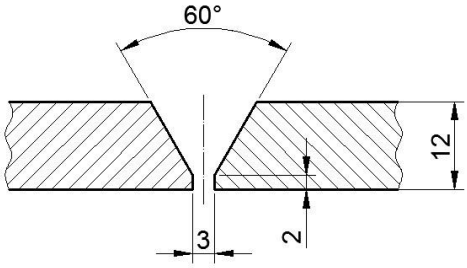
Rezultat funkcije praćenja zavarenog spoja

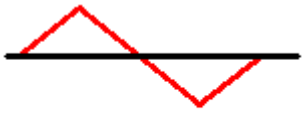


Tablica 18. prikazuje funkciju praćenja spoja uslijed korigiranja određenih parametara.

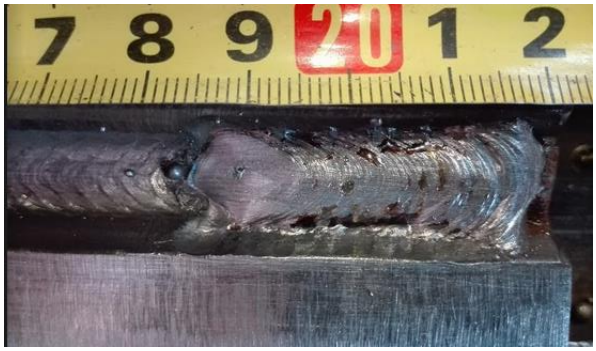
Tablica 18. Podešavanje parametara – korigiranje određenih parametara

Priprema spoja



Parametar			Vrijednost / odabir
Električni luk	Vrsta prijenosa metala		Impulsno zavarivanje
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		**15**
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Amplituda	**Lijeva**	**2,2 mm**
		Desna	**2,2 mm**
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Linearno
Funkcija praćenja	**Brzina korekcije**	**Horizontalna**	**3**
		Vertikalna	**3**
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5
	Širina praćenja devijacije		10 mm

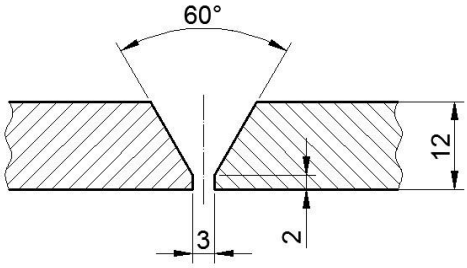
Rezultat funkcije praćenja zavarenog spoja



Tablica 19. prikazuje funkciju praćenja spoja uslijed korigiranja parametara tablice 18.

Tablica 19. Podešavanje parametara – korigiranje parametara tablice 18.

Priprema spoja



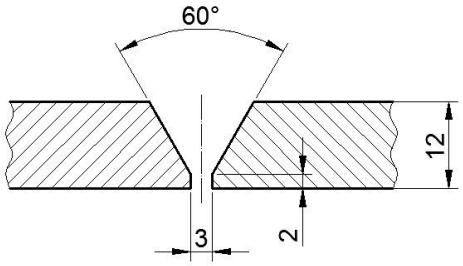
Parametar			Vrijednost / odabir
Električni luk	Vrsta prijenosa metala		Impulsno zavarivanje
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		**20**
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Amplituda	**Lijeva**	**2,5 mm**
		Desna	**2,5 mm**
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Linearno
Funkcija praćenja	**Brzina korekcije**	**Horizontalna**	**5**
		Vertikalna	**5**
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5
	Širina praćenja devijacije		10 mm

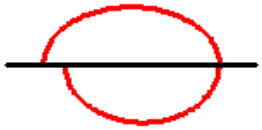
Rezultat funkcije praćenja zavarenog spoja

Tablica 20. prikazuje funkciju praćenja spoja podešavanjem parametra njihanja.

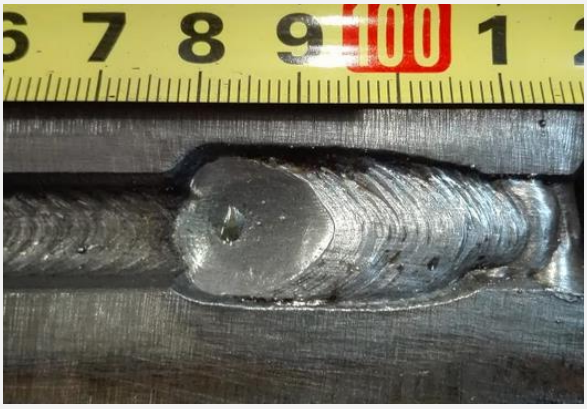
Tablica 20. Podešavanje parametara - tehnika njihanja

Priprema spoja



Parametar			**Vrijednost / odabir**
Električni luk	Vrsta prijenosa metala		Impulsno zavarivanje
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		**25**
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Radijus	**Lijeva**	**4 mm**
		Desna	**4 mm**
	Omjer kružnica	**Prednja**	**10 %**
		Stražnja	**75 %**
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Kružno
Funkcija praćenja	Brzina korekcije	Horizontalna	5
		Vertikalna	5
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5

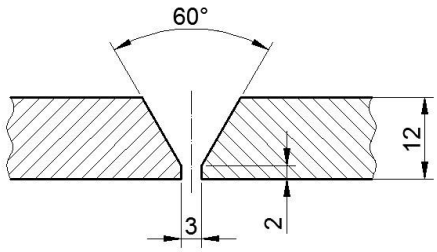
Rezultat funkcije praćenja zavarenog spoja

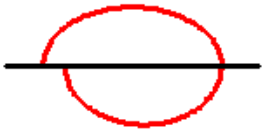


Tablica 21. prikazuje funkciju praćenja spoja podešavanjem parametra njihanja.

Tablica 21. Podešavanje parametara – korigiranje parametara tablice 20

Priprema spoja



Parametar			Vrijednost / odabir
Električni luk	Vrsta prijenosa metala		Impulsno zavarivanje
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		**25**
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Radijus	**Lijeva**	**2 mm**
		Desna	**2 mm**
	Omjer kružnica	**Prednja**	**10 %**
		Stražnja	**75 %**
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Kružno
Funkcija praćenja	Brzina korekcije	Horizontalna	5
		Vertikalna	5
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5

Rezultat funkcije praćenja zavarenog spoja

Analiza i komentari na tablice 17., 18.,19.,20. i 21

U tablici 17. vidljivo je da identične parametre funkcije praćenja spoja senzora električnog luka nije moguće primijeniti na različite debljine materijala. Zbog promjene debljine materijala s 10 mm na 12 mm, dolazi do promjene geometrije i promjene oblika žlijeba što zahtjeva korigiranje određenih parametara.

U tablici 18. nakon korigiranja parametara duljine električnog luka i amplitude postiže se nešto bolji izgled zavara, no on i dalje nije tehnološki kvalitetan, a funkcija praćenja i dalje nije u potpunosti ispratila spoj čitavom duljinom.

Tablica 19. prikazuje parametre na temelju kojih se, vizualno ocjenjeno, dobiva bolji izgled zavara od prethodnih, no pred sam kraj funkcija praćenja iz nekog razloga nije ispratila korigiranu putanju već blago skreće od iste.

Kako bi postigli kvalitetno ispraćenu putanju zavarenog spoja u tablici 20. mijenja se vrsta tehnike njihanja iz linearne („*Linear*“) u kružnu („*Circle*“). Kod ove promjene u kružno njihanje, potrebno je podesiti nove parametre poput radijusa („*Radius*“) i omjer kružnica („*Circle Rate*“), koji zamjenjuju parametar linearnog njihanja amplitudu („*Amplitude*“). U prvom pokušaju zbog prevelikog iznosa amplitude, funkcija praćenja spoja nije ispratila spoj čitavom duljinom i previše je otišla u širinu, odnosno u osnovni materijal.

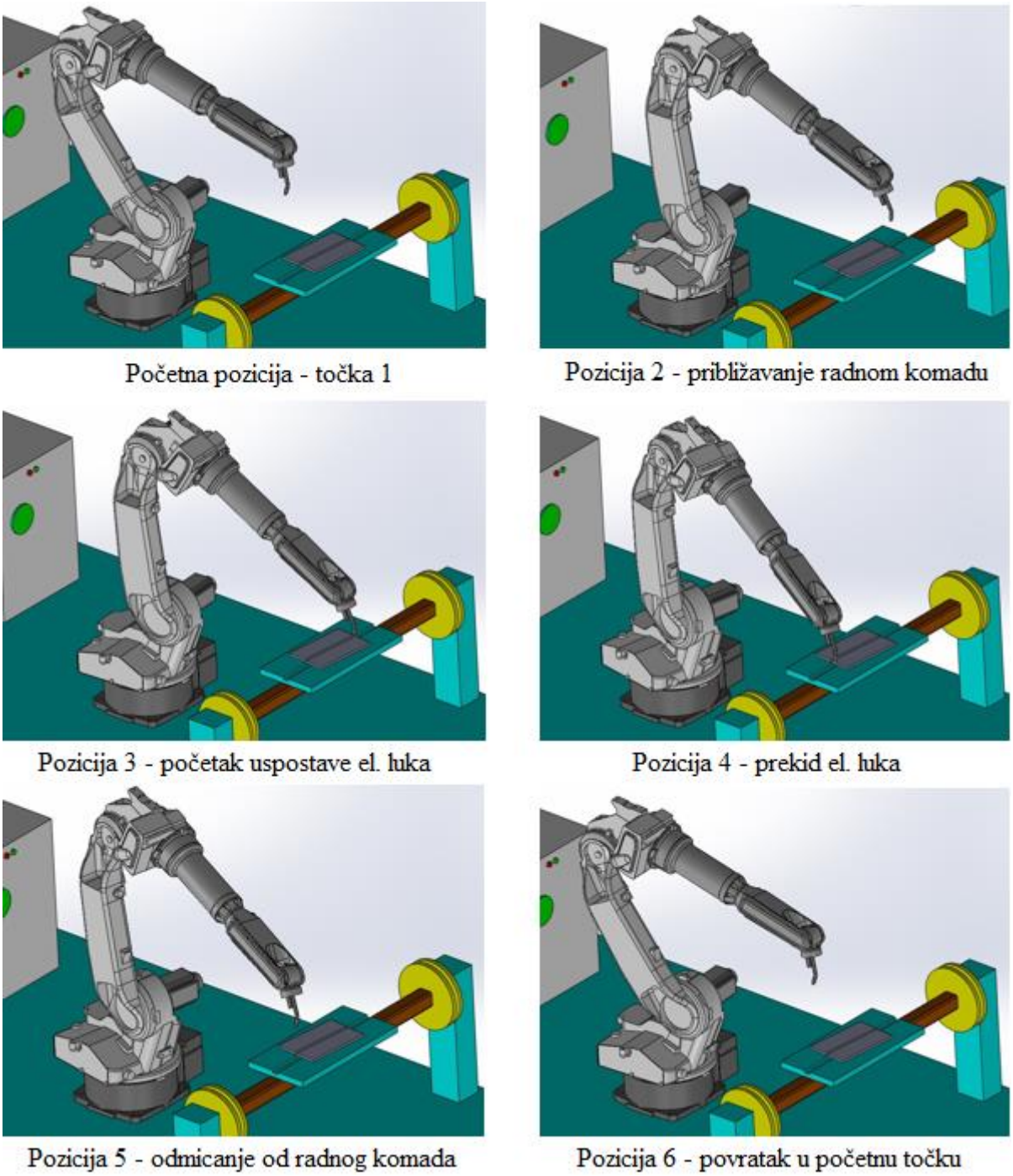
Tablica 21. sadrži korigirane parametre tablice 20. te prikazuje kako je funkcija praćenja spoja senzora električnog luka kvalitetno ispratila korigiranu putanju zavarenog spoja, a može se reći da vizualnom kontrolom zavareni spoj zadovoljava tehnološkoj kvaliteti.

Promjenom debljine materijala dokazalo se da promjena oblika i geometrije utječe na osjetljivost i princip rada senzora električnog luka. Pravilnim podešavanjem parametara poput duljine električnog luka, amplitude, brzine korekcije (horizontalne i vertikalne) i vrste tehnike njihanja i slično, moguće je ispratiti putanju pomoću funkcije praćenja senzora električnog luka uz dobivanje tehnološki kvalitetnog zavarenog spoja. Može se zaključiti da senzor električnog luka, nakon pravilno podešenih parametara, uspijeva ispratiti i korigirati pomaknutu putanju za kutni pomak od 5° u odnosu na programiranu putanju robota.

5.6. Definiranje optimalnih parametara senzora električnog luka

U ovom poglavlju istražuje se koliku duljinu i koliko odstupanje može ispratiti robotska ruka uz uključen senzor električnog luka. Uzorak odnosno radni komad na kojem se testira funkcija praćenja robota kutno je pomaknut za 5° u odnosu na programiranu putanju robota.

Sljedeći niz slika prikazuju programiranje putanje robota za ispitivanje maksimalnih mogućnosti tj. odstupanja od programirane putanje koju vrši funkcije praćenja senzora el. luka.

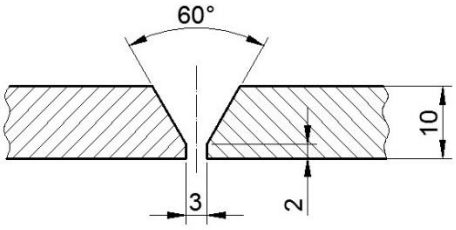


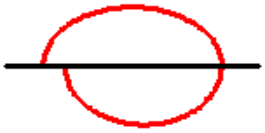
Slika 78. Programiranje putanje robota

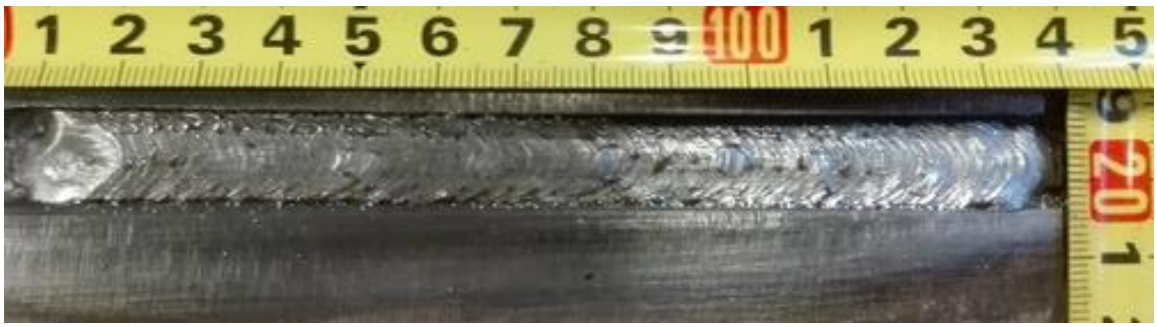
Tablica 22. sadrži podešene parametre te rezultate praćenja spoja.

Tablica 22. Parametri zavarivanja

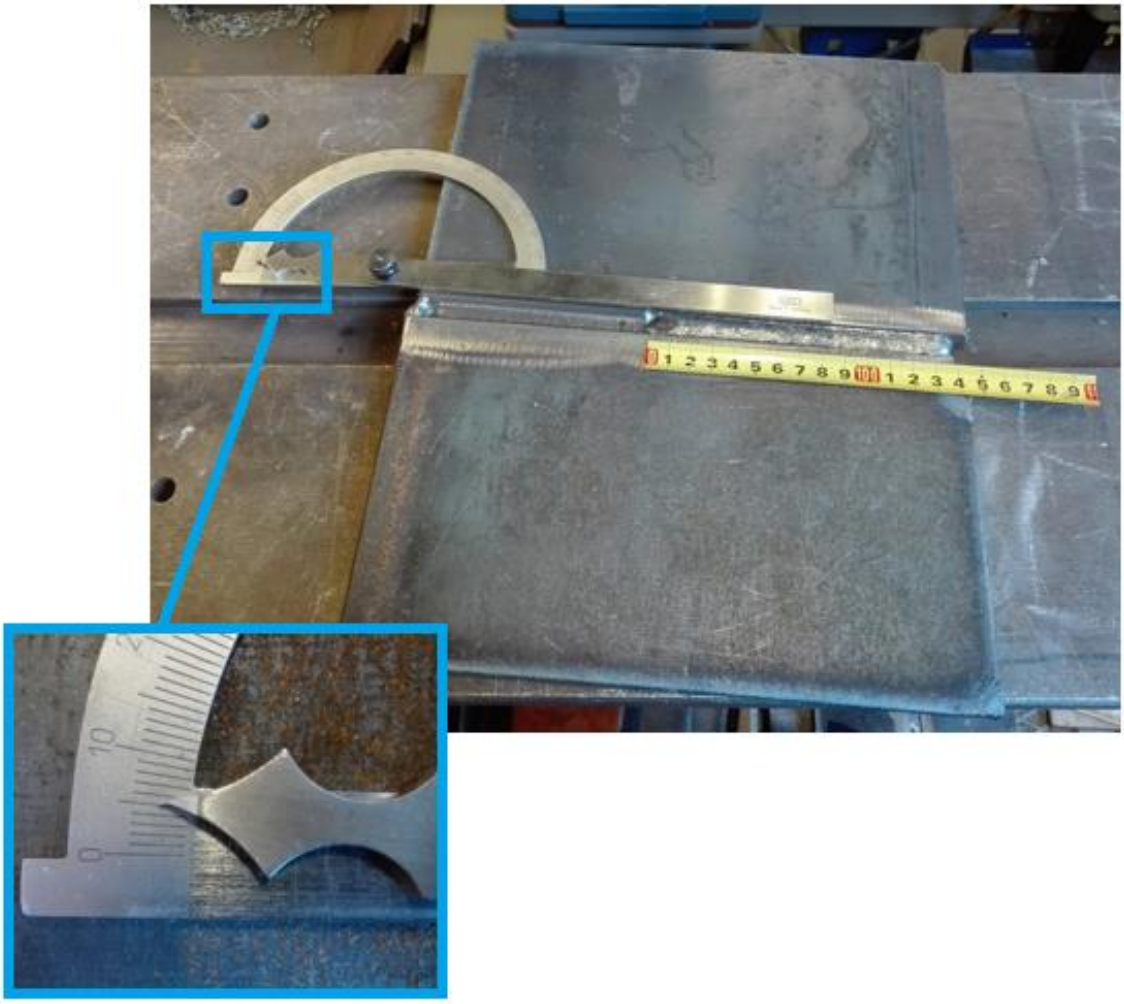
Priprema spoja



Parametar			Vrijednost / odabir
Električni luk	Vrsta prijenosa metala		Impulsno zavarivanje
	Struja zavarivanja		130 A
	Duljina električnog luka		15
	Brzina zavarivanja		25 cm/min
Njihanje	Frekvencija		2 Hz
	Radijus	Lijeva	3 mm
		Desna	3 mm
	Omjer kružnica	Prednja	10 %
		Stražnja	75 %
	Vrijeme zadržavanja	¼ puta	0 s
		Centar	0 s
		¾ puta	0 s
	Vrsta njihanja		 Kružno
Funkcija praćenja	Brzina korekcije	Horizontalna	5
		Vertikalna	5
	Odstupanje pištolja	Horizontalno	5
		Vertikalno	5
	Širina praćenja devijacije		100 mm

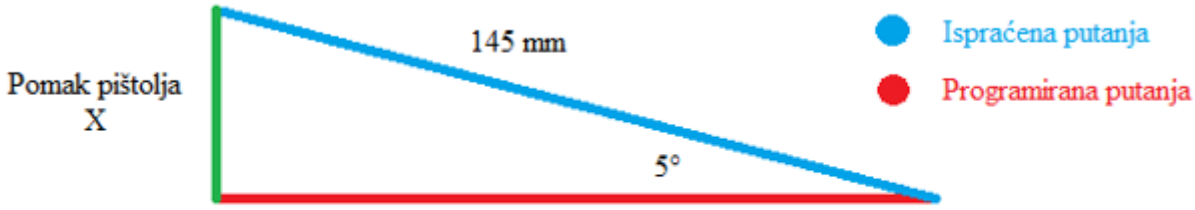


Funkcija praćenja senzora električnog luka kvalitetno je ispratila je spoj kod kutnog pomaka za 5° u iznosu duljine od 145 mm (Slika 79.)



Slika 79. Maksimalna duljina ispraćenog spoja kod kutnog pomaka od 5° = 145 mm

Odmak pištolja u odnosu na programiranu putanju izračunava se preko trigonometrijskih funkcija kao što je prikazano na slici 80.



$$sin\ 5° = \frac{x}{145\ mm}\ ;\ \rightarrow x = 145 \cdot \sin 5°\ ; x = 12{,}7\ mm$$

Slika 80. Izračun maksimalnog pomaka pištolja

Maksimalni pomak pištolja prema podešenim parametrima iz tablice 22. i duljini ispraćenog spoja od 145 mm iznosi 12,7 mm.

Kratki osvrt na eksperimentalno istraživanje

Na temelju rezultata dobivenih eksperimentalnim istraživanjem, funkcija praćenja zavarenog spoja senzora električnog luka kvalitetno prati spoj samo kod optimalno podešenih parametara. Najvažnije za funkcioniranje praćenja spoja senzora električnog luka je obavezno uključivanje funkcije njihanja. S obzirom da postoje različite vrste odnosno tehnike njihanja, poput linearne i kružne koje su provedene u ovom radu, zahtjeva se i optimalno podešavanje parametara vezanih uz određenu tehniku njihanja. Kod linearne tehnike njihanja potrebno je podesiti parametre frekvenciju, lijevu i desnu amplitudu, vrijeme zadržavanja koje obavezno mora biti postavljeno na vrijednost nula kako se ne bi ometao signal i sl. Kružna tehnika njihanja zahtjeva optimalno podešavanje parametara radijusa te omjera prednje i stražnje kružnice. Unatoč činjenici da linearna tehnika njihanja osigurava „najčišći“ signal jakosti struje, ovim eksperimentalnim istraživanjem dokazano je da kružna tehnika njihanja daje bolje rezultate tj. kvalitetnije ispraćeni zavareni spoj i tehnološki kvalitetniji izgled zavarenog spoja.

Osim parametara vezanih uz tehniku njihanja, vrlo važno je optimalno podesiti parametre vezane uz samu funkciju praćenja zavarenog spoja senzora električnog luka. Veliki utjecajni parametar za kvalitetno praćenje spoja i tehnološki zadovoljavajući zavareni spoj svakako je brzina horizontalne i vertikalne korekcije. Ovaj parametar mora biti usklađen s parametrima vezanih uz tehniku njihanja i parametrima električnog luka da se postigne kvalitetno funkcioniranje funkcije praćenja senzora električnog luka.

Na kvalitetu funkcije praćenja zavarenog spoja senzora električnog luka svakako ima utjecaj i vrsta prijenosa metala u električnom luku. Dokazano je da impulsno zavarivanje zbog kontroliranog prijenosa metala i periodičnog odvajanja kapljica čime električni luk postaje stabilniji, ne stvara smetnje i šumove u povratnom signalu senzora električnog luka te se time postiže kvalitetnije ispraćena putanja zavarenog spoja u odnosu na prijenos metala kratkim spojevima koji zbog visokih parametara i neperiodičnog odvajanja kapljica dovodi do prskanja i variranja unosa topline što predstavlja smetnje u povratnom signalu senzora električnog luka. Senzor električnog luka pokazuje izrazitu osjetljivost na smetnje koje se javljaju kod prijenosa metala kratkim spojevima.

Upotrebom senzora električnog luka nakon optimalno podešenih parametara tijekom eksperimentalnog istraživanja postigli su se rezultati zavidne kvalitete te se upotreba tehnologije robotiziranog zavarivanja opremljena senzorom električnog luka dokazala dostojnom za primjenu u industrijskoj proizvodnji. Primjeni senzora električnog luka u stvarnoj

proizvodnji svakako ide u prilog troškovno prihvatljiva niska cijena te jednostavna i kompaktna oprema koje ne zahtjeva i ne zauzima dodatni radni prostor.

Ograničenje prepoznato prilikom izvođenja eksperimentalnog istraživanja je to da kod zavarivanja kratkim spojevima dolazi do neperiodičnog odvajanja kapljica i neujednačenog unosa topline što predstavlja smetnje u povratnom signalu koje dovode do prekida ili nekvalitetno ispraćenog spoja. Na temelju ove spoznaje zaključuje da primjena senzora električnog luka nije moguća za zavarivanje tankih limova kod kojih se najčešće zavarivanje vrši prijenosom metala kratkim spojevima. Također, s obzirom da senzor radi na principu mjerenja parametara električnog luka kod promjene geometrije i oblika pripreme spoja uz obavezno uključenu tehniku njihanja, primjena senzora električnog luka moguća je samo kod materijala većih debljina gdje je potrebna kvalitetna priprema spoja. Dodatno, funkcija praćenja zavarenog spoja senzora električnog luka nije u stanju kvalitetno zavariti i ispratiti korijenski prolaz. Da bi funkcija praćenja senzora električnog luka kvalitetno ispratila zavareni spoj, potrebno je prethodno zavariti korijenski prolaz.

6. ZAKLJUČAK

Razvojem različitih grana industrije tokom posljednjih nekoliko desetljeća dovelo je do razvoja tehnologije robotiziranog zavarivanja koje je uvelo čitav niza velikih mogućnosti i prednosti u metalnoj odnosno industrijskoj proizvodnji.

Uvođenjem robotiziranih zavarivačkih stanica u proizvodne sustave pospješuje se fleksibilnost i produktivnost proizvodnje. Čovjek više nije izložen teškim, mukotrpnim i opasnim poslovima već ga u obavljanju ovakvih poslova zamjenjuje robot.

S vremenom zahtjevi na kvalitetu, preciznost i toleranciju radnih komada postaju sve stroži, te dolazi do razvoja različitih vrsta senzora kojima se opremaju robotizirane zavarivačke stanice. Implementacijom senzora u robotiziranu zavarivačku stanicu, smanjuje se utjecaj operatera na procese zavarivanja i oslobađa ga se iscrpljujućeg programiranja koje je često bilo popraćeno mnogobrojnim pogreškama. Senzorima opremljena robotizirana zavarivačka stanica omogućava veću fleksibilnost, produktivnost i ekonomičnost u proizvodnji uz bolju kvalitetu rezultata zavarenih spojeva. Omogućena su veća preciznost i uže tolerancije radnog komada, minimalizirane su pogreške prilikom programiranja te su smanjene greške kod zavarenog spoja.

Podjela senzora je mnogobrojna, no neka najosnovnija podjela je na senzore za mjerenje tehnoloških parametara i senzore za mjerenje geometrijskih parametara. Među najistaknutijim senzorima koji se primjenjuju u industrijskoj proizvodnji su optički senzori i senzor električnog luka. S obzirom na visoku cijenu te kompleksnu i skupu opremu koja svojim elementima zauzima radni prostor, optički senzori svoju su primjenu našli u industriji gdje je prag troškova visok, no i dalje prihvatljiv.

Senzor električnog luka ima prednosti jer je u industriji cjenovno prihvatljiv, kompaktan je i ne predstavlja opterećenje na pištolj za zavarivanje za razliku od optičkih senzora koji se montiraju za pištolj i samim time zauzimaju dodatni radni prostor. Uz navedene prednosti, moguće je vršiti zavarivanje u uskim prostorima te postići uske tolerancije i precizne dimenzije.

Osnovna zadaća samog senzora električnog luka je kompenziranje programirane putanje robotske ruke prilikom zavarivanja kada zbog pogreške u pripremi spoja ili velikog unosa topline dolazi do pomaka ili deformacije radnog komada te stvarna putanja zavarenog spoja odstupa od programirane. U eksperimentalnom dijelu rada prema određenom obliku i dimenziji pripremljenog spoja definirani su parametri senzora električnog luka koji nastoje pratiti i korigirati putanju zavarenog spoja.

Nakon praktičnih probi, dokazano je da veliki utjecaj na funkciju praćenja senzora električnog luka imaju parametri vezani uz tehniku njihanja (vrsta tehnike njihanja, frekvencija,

amplituda, radijus, vrijeme zadržavanja…), parametri vezani uz električni luk (vrsta prijenosa metala, struja zavarivanja, brzina zavarivanja, duljina električnog luka,…) i parametri vezani uz funkciju praćenja (brzina korekcije, odstupanje pištolja,…). Osim navedenih definiranih parametara, eksperimentom je dokazano da promjena oblika i geometrije materijala uzorka također utječe na osjetljivost funkcije praćenja zavarenog spoja senzora električnog luka.

Nakon praktičnih proba, prijenos metala impulsnim zavarivanjem zbog kontroliranog prijenosa metala i periodičnog odvajanja kapljica te stabilnijeg električnog luka daje tehnološki i izgledom kvalitetan zavareni spoj uz kvalitetno ispraćenu putanju zavarenog spoja koja je korigirana za 5°, odnosno čiji maksimalni pomak od programirane putanje, pomak pištolja, iznosi 12,7 mm. Uz podešene parametre vrijednosti jakosti struje od 130 A i brzinu zavarivanja od 25 cm/min, optimalna vrijednost duljine električnog luka kreće se u rasponu od 15 do 25, ovisno o debljini osnovnog materijala (15 – 20 za debljinu osnovnog materijala 10 mm, 20 –25 za debljinu osnovnog materijala 12 mm). Kod vrijednosti duljine električnog luka manje od 15, uspostava električnog luka je otežana ili ni ne dolazi do uspostave električnog luka. Za vrijednosti duljine električnog luka većih od 25 dolazi do izgaranja osnovnog materijala zbog previsoko podešene vrijednosti duljine električnog luka.

Parametar brzina horizontalne i vertikalne korekcije, ujedno jedan i od najutjecajnijih parametara koji utječe na funkciju praćenja zavarenog spoja senzora električnog luka, pri niže postavljenim vrijednostima (0, 1, 2, 3) daje nekvalitetne rezultate zavarenog spoja tj. funkcija praćenja nekvalitetno prati spoj, a programirana putanja robota nije precizno korigirana. Kod više postavljenih vrijednosti brzine horizontalne i vertikalne korekcije (4 i 5), postiže se kvalitetno ispraćena putanja zavarenog spoja uz tehnološki i izgledom zadovoljavajućim rezultatima.

Vrsta tehnike njihanja, kao i parametri vezani uz nju koje je potrebno podesiti, također imaju veliki utjecaj na samu funkciju praćenja zavarenog spoja. Parametri vezani uz vrstu tehnike njihanja usko su povezani s oblikom i geometrijom radnog komada te s njegovom debljinom. Kod primijenjene linearne tehnike njihanja uz podešenu vrijednost frekvencije njihanja 10 Hz na uzorku debljine 10 mm najoptimalnijom vrijednošću lijeve i desne amplitude njihanja pokazala se vrijednost od 2,2 mm. Uz identično podešene parametre, na uzorku debljine 12 mm, optimalnom vrijednošću lijeve i desne amplitude se pokazala vrijednost od 2,5mm. Za primijenjenu kružnu tehniku njihanja kod uzorka debljine 12 mm, vrijednosti radijusa u iznosu od 3 mm i omjera prednje i stražnje kružnice u iznosu 10% : 75% pokazala se najoptimalnijom. Za vrijednosti amplitude i radijusa većih od optimalnih, širina zavarenog spoja je velika, dok kod podešenih nižih vrijednosti od optimalnih dolazi do nedovoljne širine

spoja i pojave kanala. U oba slučaja kvaliteta zavarenog spoja nije tehnološki zadovoljavajuća, odnosno narušena su svojstva zavarenog spoja.

Da bi se postigao kvalitetno ispraćeni zavareni spoj potrebno je uskladiti vrijednost definiranih parametara sa oblikom i geometrijom pripreme spoja radnog komada. Senzor električnog luka unutar optimalno definiranih parametara daje izvanredno zavidne i kvalitetne rezultate i to je razlog koji opravdava njegovu primjenu u industriji.

Tendencija primjene senzora kod robotiziranog zavarivanja raste. Implementacijom različitih vrsta senzora u robotizirane zavarivačke stanice omogućene su razne prednosti poput poboljšanja kvalitete zavarivanja, povećavanje produktivnosti i fleksibilnosti proizvodnje, smanjenja troškova, povećanje konzistencije ponovljivosti zavarivanja, minimalizacija unosa operatera kod odabira parametara za zavarivanje. S obzirom na sve strože zahtjeve na kvalitetu, točnost i preciznost, upotreba senzora je neizbježna, a robotizirano zavarivanje bez korištenja senzora postat će nezamislivo.

LITERATURA

[1] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/povije.html (dostupno 1.10.2018.)

[2] https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSZOnRiL0XmzNjmhfYE9gfzCyQjBRDJ_inXOqvBqc3aedkf9NPp (dostupno 1.10.2018.)

[3] Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.

[4] Kralj S., Kožuh Z., Andrić Š.: Zavarivački i srodni postupci, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja i Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.

[5] https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_MIG_postupkom (dostupno 2.10.2018.)

[6] http://honor.co.th/images/N-Knowledge/Welding/Mig-02.jpg (dostupno 2.10.2018.)

[7] Smith. D., Weldings Skills and Tehnology, McGraw-Hill, International Edition,1986.

[8] https://www.bakersgas.com/mig-welding-advantages-disadvantages.php (dostupno 2.10.2018.)

[9] https://www.rime.de/en/welding/mag-welding/ (dostupno 2.10.2018.)

[10] https://www.oerlikon-welding.com/processes/mig-mag-welding-process (dostupno 2.10.2018.)

[11] Strojevi i oprema za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013. https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1444813276-0-strojeviiopremazazavarivanjezkpio-1.pdf (dostupno 2.10.2018.)

[12] https://www.lincolnelectric.com/assets/global/products/consumable_miggmawwires-superarc-superarcl-56/c4200.pdf (dostupno 2.10.2018.)

[13] Kožuh. Z.: Mehanizacija, automatizacija i robotizacija u zavarivanju i srodnim postupcima, Zbornik radova, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, 2005.

[14] http://www.selcoweld.com/images/prodotti/robot/ROB_BC.jpg (dostupno 2.10.2018.)

[15] https://link.springer.com/article/10.1186/s40712-015-0042-y (dostupno 2.10.2018.)

[16] https://medium.com/precoil/the-business-model-for-robot-food-136d461fbfb0 (dostupno 2.10.2018.)

[17] http://servus.hr/wp-content/uploads/2017/09/witp.jpg (dostupno 2.10.2018.)

[18] https://www.google.hr/imgres?imgurl=http://www.qd-skf.com/uploads/180110/1-1P1101A43c57.jpg&imgrefurl=http://www.qd-skf.com/gongchenganli/156.html&h=369&w=500&tbnid=ZICf0yNfeeag6M&tbnh=193&tbnw=261&usg=K_jfGjdvyj6cwdqD2DpDxaneRN7k4=&hl=hr&docid=uzfh0iLoVHUteM (dostupno 2.10.2018.)

[19] http://www.mckautomacao.com.br/en/celulas-robotizadas/images/ind-automotiva/img8.png (dostupno 10.2.2018.)

[20] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1397809652-0-robotiziranozavarivanjeiprevlacenje_podloge4.pdf (dostupno 3.10.2018.)

[21] https://vub.hr/images/uploads/3314/programiranje_i_vodenje_industrijskih_robota.pdf (dostupno 3.10.2018.)

[22] Radočaj D., Jurica M., Kos S., Pavlic T.: Programiranje industrijskih robota za potrebe robotiziranog zavarivanja // Zavarivanje 2016., broj 1/2, str. 5 – 13

[23] Norberto Pires J., Loureiro A., Bolmsjo G.: Welding Robots – Technology, System Issues and Applications, Springer-Verlag, Germany, 2006.

[24] http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.554.3099&rep=rep1&type=pdf (dostupno 5.10.2018)

[25] file:///C:/Users/student/Downloads/tv_22_2015_4_1069_1074%20(11).pdf (dostupno 5.10.2018.)

[26] http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/cz_dipl3/3.1.pdf (dostupno 5.10.2018.)

[27] https://dh778tpvmt77t.cloudfront.net/images/products/8255.jpg (dostupno 5.10.2018.)

[28] https://slideplayer.com/slide/4895517/ (dostupno 5.10.2018.)

[29] https://www.millerwelds.com/products/insight/insight-arcagent (dostupno 5.10.2018.)

[30] Ushio M., Onoe H.: Automation Tehnology of Arc Welding, Technical Commission on Welding Processes Japan Welding Society, 1996.

[31] http://foto-info.si/ccd-in-cmos-senzor-pri-digitalnih-fotoaparatih/ (dostupno 6.10.2018)

[32] https://i.ytimg.com/vi/PMPyB2ufGN4/hqdefault.jpg (dostupno 7.10.2018.)

[33] https://s36.a2zinc.net/clients/SME/Fabtech2016/Custom/ProductLarge6865.jpg (dostupno 7.10.2018.)

[34] http://www.robotwelding.co.uk/sensing-equipment-for-robots.html (dostupno 7.10.2018.)

[35] http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/cz_dipl3/2%20uvod.pdf (dostupno 7.10.2018.)

[36] https://new.abb.com/products/robotics/application-equipment-and-accessories/arc-welding-equipment/process-support-tools/weldguide (dostupno 8.10.2018.)

[37] Kralj S., Kožuh Z., Garašić I., Remenar M., Bilić L.: Utjecaj prijenosa metala na osjetljivost elektrolučnog senzora // Zbornik radova savjetovanja Eurojoin 8 / Zagreb: Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, 2012. str. 421 – 433

[38] https://www.igm-group.com/en/products/intern:85/sensors/articlearchivshow-arc-seam-sensing-precision-welding-of-fillet-and-v-seams (dostupno 17.10.2018.)

[39] http://dtzi.hr/upload/pdf/6.%20SEMINAR/RADOVI/2.%20Novine%20u%20tehnologiji%20zavarivanja%20kod%20Fanuc%20robotskih%20aplikacija.pdf (dostupno 17.10.2018.)

[40] https://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/intelligent-robotic-detail.aspx (dostupno 17.10.2018)

[41] https://library.e.abb.com/public/8ca2d32ae35d123cc125799f00592be4/Sensor%20Based%20Adaptive%20Arc%20Welding%20White%20Paper.pdf (dostupno 25.10.2018.)

[42] http://tvagonm.com.ua/en/catalog/robotizirovannye_svarochnye_kompleksy/automatic_joint_laser_tracking_system_for_longitudinal_seam_welding/ (dostupno 25.10.2018.)

[43] http://lefebvre-chaudronnerie.fr/sites/default/files/portfolio/vis%20sans%20fin%20et%20auge.jpg (dostupno 25.10.2018.)

[44] https://www.yumpu.com/xx/document/view/37520538/katalog-2012-arv-slopdf-varstroj/32 (dostupno 5.11.2018.)

[45] https://www.eurobots.net/Other-Robots-robots-OTC-Daihen-ALMEGA-AX-V6-arc-welding-robots--p91-en.html (dostupno 5.11.2018.)

[46] http://www.rolan-robotics.nl/content/1043/download/clnt/10292_AX-V6(L).V16.G3.pdf (dostupno (5.11.2018.)

[47] https://www.otc-daihen.de/index.php?id=0000000386 (dostupno 7.11.2018.)

[48] http://www.b2bmetal.eu/en/pages/index/index/id/141/ (dostupno 7.11.2018.)

[49] Almega AX series: Instruction manual: Arc sensor (AX – AR/AXAR2); OTC Daihen Europe GmbH, No. 1L8920B-E-1

PRILOZI

I. CD – R disc